

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Kranželić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Josip Kranželić

Zagreb, 2016.

Izjava i zahvala

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio u potpunosti samostalno, služeći se stečenim znanjima i stručnom literaturom koja je navedena u sadržaju rada.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli prilikom pisanja ovoga rada i studiranja, a posebno mentoru profesoru dr.sc. Zoranu Kožuhu i asistentici dr.sc. Maji Jurici na opsežnom pruženom znanju, ljubaznosti, pristupačnosti, savjetima i suradnji tijekom pisanja i izrađivanja završnog rada.

Laborantima Zdenku Batiniću, Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću s Katedre za zavarene konstrukcije koji su mi pomogli tijekom izvođenja eksperimentalnog rada.

Roditeljima Dragutinu i Ines, te braći Mateju i Tinu na ukazanoj podršci, enormnom odricanju i strpljenju koje su imali za mene tijekom studiranja.

Djevojci Petri, koja je svojom strpljivošću i motivacijom pomogla da lakše prebrodim sve probleme i uspješno položim sve fakultetske obveze.

Od srca Vam hvala!

Josip Kranželić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **JOSIP KRANŽELIĆ**

Mat. br.: **0035187226**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **PRIMJENA LIJEPLJENJA ZA SPAJANJE METALA**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **APPLICATION OF ADHESION BONDING IN METAL JOINING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je shodno literaturnim podacima obraditi primjenu lijepljenja za spajanje metala. Usporediti tehnologiju lijepljenja s tehnologijom zavarivanja te navesti primjenu. Obraditi načine pripreme površine, vrste ljepila, njegovo nanašanje i formiranje spoja. Također, potrebno je obraditi i oblikovanje spojeva za lijepljenje.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti utjecaj pripreme površine na čvrstoću lijepljenja. Za osnovni materijal odabrati konstrukcijski čelik i ljepila pogodna za lijepljenje istog.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
1. UVOD	1
2. LIJEPLJENJE	3
2.1. Općenito o lijepljenju	3
2.2. Mehanizam lijepljenja	5
2.3. Priprema lijepljenih spojeva	11
2.4. Nanašanje ljepila	15
2.5. Oblikovanje lijepljenih spojeva	16
2.6. Naprave za učvršćivanje lijepljenog spoja tijekom stvrdnjavanja	19
2.7. Usporedba tehnologije lijepljenja sa tehnologijom zavarivanja	20
2.8. Parametri koji utječu na čvrstoću spoja	23
3. VRSTE LJEPILA	26
3.1. Epoksi ljepila	26
3.2. Cijanoakrilati	27
3.3. Silikonska ljepila	28
3.4. UV stvrdnjavajuća ljepila	29
4. PRIMJENA LJEPILA U INDUSTRIJI	30
5. EKSPERIMENTALNI DIO	34
5.1. Opis eksperimenta	34
5.2. Priprema površine lijepljenih spojeva	35
5.3. Vrsta ljepila	36
5.4. Stezanje spojeva	38
5.5. Čvrstoća lijepljenih spojeva	39
6. ZAKLJUČAK	45
7. LITERATURA	46

POPIS SLIKA

Slika 1. Adhezijske i kohezijske veze u lijepljenom spoju [3].....	3
Slika 2. Proces difuzije [23]	5
Slika 3. Elektrostatičko povezivanje [23]	6
Slika 4. Kemijsko povezivanje [23]	6
Slika 5. Mehaničko sidrenje [23]	7
Slika 6. Kontaktni kut kod kvašenja [5]	7
Slika 7. Londonove disperzijske sile [6]	7
Slika 8. Vrijeme stvrdnjavanja ljepila [8]	9
Slika 9. Smična čvrstoća raznih ljepila ovisno o temperaturi [3].....	9
Slika 10. Površine pjeskarenih čelika i neobrađenih čelika [14].....	11
Slika 11. Sredstva za čišćenje i odmašćivanje površina [11]	12
Slika 12. Utjecaj nečistoća na adheziju i čvrstoću spoja [8]	13
Slika 13. Pasivni sloj na nehrđajućem čeliku [12]	13
Slika 14. Oprema za ručno nanošenje ljepila [15]	15
Slika 15. Poluautomatski uređaj i robot za nanašanje ljepila [16]	15
Slika 16. Lijepljeni preklopni spoj limova, A - površina lijepljenog spoja, l - duljina, s - debljina lima [3]	16
Slika 17. a) Ljuštenje spoja, b) smično napregnuti spoj i c) vlačno napregnuti spoj [4]	17
Slika 18. Utjecaj duljine preklopa na čvrstoću spoja [25].....	19
Slika 19. Autoklav [27]	19
Slika 20. Galvanska korozija kod spojeva [8].....	22
Slika 21. Usporedba naprezanja kod zavarenog i lijepljenog spoja [8]	22
Slika 22. Idealno hrapava površina [13].....	23
Slika 23. Odnos duljine lijepljenog spoja i debljine osnovnog materijala [4]	23
Slika 24. Utjecaj debljine sloja ljepila na čvrstoću spoja [25]	24
Slika 25. Podjela ljepila prema kemijskom sastavu [24]	26
Slika 26. Epoksidno dvokomponentno ljepilo [17].....	27
Slika 27. Cijanoakrilati [18]	28
Slika 28. Silikonsko ljepilo [17].....	28
Slika 29. UV ljepilo [17]	29
Slika 30. Lijepljenje zrakoplovnih nosača [3].....	30
Slika 31. Ljepilo izdržljivo na sudare [10].....	31

Slika 32. Lijepljeni spojevi na vozilima [28]	31
Slika 33. Lijepljeni spojevi u interijeru zrakoplova [29]	32
Slika 34. Lijepljenje dijelova automobila [30].....	32
Slika 35. Svojstva hibridnih spojeva [20]	33
Slika 36. Lijepljenje sportske opreme [31]	33
Slika 37. Uzorci od konstrukcijskog čelika.....	34
Slika 38. Uzorak 1 (desno) i 2 (lijevo)	35
Slika 39. Uzorak 3 (desno) i 4 (lijevo)	35
Slika 40. Uzorak 5 (desno) i 6 (lijevo)	36
Slika 41. Ljepilo Loctite EA 3430 A&B	36
Slika 43. naprava za pritiskanje spojeva [9].....	38
Slika 44. Uzorci tijekom 24-satnog mirovanja.....	38
Slika 45. Ovisnost čvrstoće spoja o vremenu stvrdnjavanja [22]	39
Slika 46. Univerzalna kidalica	39
Slika 47. Ispitivanje uzorka 1	41
Slika 48. Adhezijski lom uzoraka 1 (desno) i 2 (lijevo).....	41
Slika 49. Ispitivanje uzorka 3	42
Slika 50. Uzorak 3 (desno) i 4 (lijevo)	42
Slika 51. Kliješta za stezanje uzoraka na kidalici	43
Slika 52. Ispitivanje uzorka 5	43
Slika 53. Ispitivanje uzorka 6	44
Slika 54. Uzorci 5 (lijevo) i 6 (desno)	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost smične čvrstoće lijepljenog spoja o temperaturi [4].....	10
Tablica 2. Upute za kemijsku obradu različitih metala prije lijepljenja [7].....	14
Tablica 3. Preporuke za oblikovanje lijepljenih spojeva [4].....	17
Tablica 4. Usporedba tehnologija lijepljenja i zavarivanja.....	21
Tablica 5. Epoksidno ljepilo Loctite EA 3430 A&B [22].....	38
Tablica 6. Otpornost lijepljenih spojeva (Loctite EA 3430 A&B) na otapala i kemikalije [22].	38
Tablica 7. Usporedba različito pripremljenih površina kod lijepljenih spojeva.....	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
v	temperatura	$^{\circ}\text{C}$
σ	naprezanje	N/mm^2
F	sila	N
E	modul elastičnosti	N/mm^2
τ	smično naprezanje	N/mm^2
A	istezljivost	%
l	duljina lijepljenog spoja	mm
Δl	produljenje	mm
s	debljina lijepljenog spoja	mm
d	debljina sloja ljepila	mm
G	modul smicanja	N/mm^2
K	čimbenik ljepila	$\sqrt{\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$
M	čimbenik materijala	$\sqrt{\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$
f	čimbenik oblikovanja	

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je razmotriti lijepljenje kao jedan od postupaka spajanja metala te utvrditi utjecaj hrapavosti površine na mehanička svojstva lijepljenog spoja.

U radu su detaljno objašnjene karakteristike i princip djelovanja ljepila. Detaljno su navedene podjele ljepila kao i njihove osnovne karakteristike. Opisane su prednosti i nedostaci lijepljenih spojeva kao i primjene ljepila u industriji.

U eksperimentalnom dijelu rada je proučen utjecaj pripreme površine na čvrstoću lijepljenog spoja. U zaključku završnog rada analizom dobivenih podataka, parametara i rezultata objašnjena je uloga i primjena te budućnost ljepila u industrijskoj proizvodnji.

Ključne riječi: Ljepilo, kohezija, adhezija, priprema površine

SUMMARY

The aim of this thesis is to discuss about bonding connection amongst metal materials and the impact of surface roughness on materials adhesive connection.

This paper illustrates in details the characteristics and properties of adhesives. Advantages and disadvantages of adhesives are also described as well as application of adhesives in industry.

In experimental part of thesis is explained the influence of surface preparation on mechanical characteristics of bonded joint. The conclusion of the thesis contains analysis of the attained results, parameters and other data. This information are used to explain role, application and future of adhesives in the industry.

Key words: adhesive, cohesion, adhesion, surface preparation

1. UVOD

Velik udio proizvoda u industriji se sklapa raznim metodama: zavarivanjem, lemljenjem, vijčanim sklopovima, uskočnim sklopovima, lijepljenjem i sličnim tehnologijama. Prednost lijepljenja u odnosu na ostale metode je brzo i efikasno obavljanje same operacije, kako na terenu, tako i u proizvodnji. Dodatna prednost lijepljenja je što nema unošenja topline u osnovni materijal te samim time ne dolazi do promjene u mikrostrukturi i mehaničkim svojstvima osnovnog materijala.

Lijepljenje je vrlo složen kemijski proces, a najjednostavnije ga se može opisati kao spajanje dijelova iz istih ili različitih materijala prijanjanjem pomoću ljepila. Ljepila se nanose u tankom sloju na jednu ili na obje površine koje se sljepljuju, uz mogućnost povišenog pritiska na spoj. Sušenjem ljepila stvara se adhezijska veza i postiže maksimalna čvrstoća lijepljenoga spoja, zbog hlapljenja medija u kojem se ljepilo primjenjuje (voda ili organsko otapalo) ili pak kemijskom reakcijom tvari sadržanih u ljepilu. Teorija lijepljenja je vrlo složena iz razloga što pritom sudjeluje niz čimbenika koji se odnose na svojstva površina koje se lijepe (kemijska aktivnost, hidrofilnost ili hidrofobnost, čistoća, hrapavost površine, homogenost), na svojstva ljepila (površinska napetost, viskoznost, polarnost, kiselost ili bazičnost, brzina sušenja) te fizikalna i mehanička svojstva stvorenoga veznoga filma [1].

Lijepljeni spojevi uz svoje prednosti također imaju i nedostatke, među kojima je najznačajniji vijek trajanja takvog spoja i nemogućnost precizno određivanja istog. Lijepljeni spojevi nakon nekog vremena počinju gubiti svoja mehanička svojstva, te ih je potrebno obnoviti ili zamijeniti.

Lijepljenje je jedan od najstarijih načina spajanja materijala. Postoje naznake da se ljepilo koristi već desecima tisuća godina, a najranije dokumentirano korištenje ljepila seže u razdoblje drevnog Egipta i Sumerske civilizacije, kada su se za lijepljenje upotrebljavale različite prirodne tvari poput, npr. borove smole, lateks kaučuka, a u hladnijim krajevima i voda (led koji nastaje zamrzavanjem vode, može zalijepiti dodirne površine nekih tijela). Vrlo su se rano počeli upotrebljavati i kazein i glina. U srednjem vijeku počela su se upotrebljavati i neka svojevremeno novootkrivena ljepila koja su bila na bazi životinjskih bjelančevina [2].

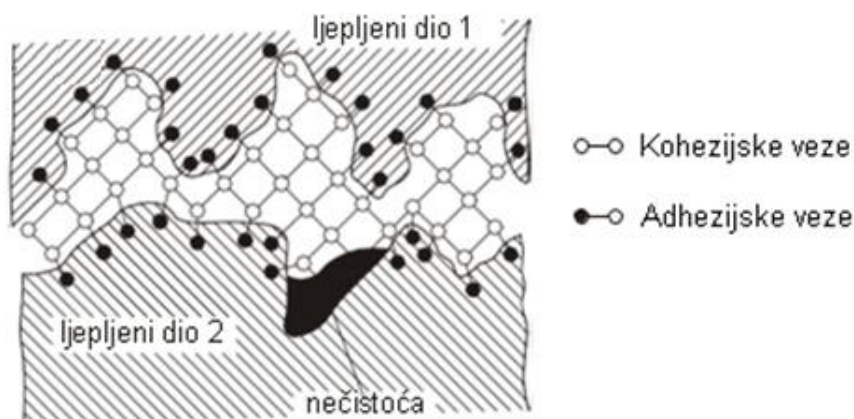
Razvoj ljepila i tehnologije lijepljenja u 20. stoljeću odgovara općem brzom razvoju industrije. Najprije su se industrijski počela upotrebljavati ljepila na bazi čistih, pa modificiranih makromolekularnih prirodnih spojeva kao što su životinjske bjelančevine, ugljikovodici biljnog podrijetla (škrob, dekstrin, prirodni kaučuk, pa acetilceluloza, nitroceluloza). Istodobno se razvijala i primjena različitih anorganskih ljepila u industriji, osobito vodenog stakla i različitih tipova cementa. U periodu između dva svjetska rata, naglo se počela razvijati proizvodnja umjetnih polimera, a istodobno s time i upotreba polimera kao sastavnih tvari ljepila. Prvo su to bile fenolformaldehidne, pa mnoge druge, osobito aminske, polimetakrilne, poliesterske, epoksidne i poliuretanske smole. Poslije drugoga svjetskog rata razvila se i teorija lijepljenja, te je time tehnologija lijepljenja dobila na dodatnoj važnosti [2].

Široki asortiman ljepila i postupaka njihove primjene čine danas lijepljenje u mnogim slučajevima povoljnijim od drugih, klasičnih načina spajanja, npr. od spajanja zakovicama i vijcima, zavarivanjem i lemljenjem. Lijepljenje je najčešće jednostavnije, brže i ekonomičnije od drugih načina spajanja. Lijepljeni spojevi imaju, između ostalog, prednost da zauzimaju manji prostor u konstrukciji od drugih spojeva (vijčani, zakovični spojevi) i laki su, naprezanja na spoju jednolično se raspoređuju, spojevi su nepropusni, otporni na koroziju, te imaju mogućnost prigušenja vibracija. Nedostaci su: manja čvrstoća spoja u usporedbi s drugim načinima spajanja (zavarivanje, lemljenje, zakivanje), potrebna im je složena priprema površine u nekim slučajevima, te nakon određenog vremena spoj gubi čvrstoću. Najčešća primjena ljepila je kod spajanja tankih limova, spona krila zrakoplova i krila ventilatora, okvira mopeda, limenih posuda, brtvljenja, u autoindustriji i sl [2].

2. LIJEPLJENJE

2.1. Općenito o lijepljenju

Ljepila su tvari koje mogu spajati različita tijela kombiniranim djelovanjem prijanjanja na dodirne površine (adhezije) i vlastite unutarnje čvrstoće (kohezije), pritom ne mijenjajući bitno strukturu spojenih tijela. Na slici 1 su prikazane adhezijske i kohezijske veze koje se javljaju u lijepljenom spoju. Ta djelovanja mogu biti različitog intenziteta, pa, već prema tome koje je od njih slabije, lom preopterećenog zalijepljenog spoja nastaje između sloja ljepila i tijela (adhezijski lom) ili u masi sloja ljepila (kohezijski lom). Da bi se ljepilo stvrdnulo, potrebno je određeno vrijeme. Vrijeme stvrdnjavanja višekomponentnih, reaktivnih ljepila je vrijeme koje proteče od trenutka kad se pomiješaju komponente do potpunog stvrdnjavanja. Radno vrijeme, tj. vrijeme od trenutka miješanja do početka stvrdnjavanja (tijekom kojeg se smjesa može nanijeti na površinu), nešto je kraće. Otvoreno vrijeme je ono vrijeme koje proteče od trenutka nanošenja ljepila do stavljanja sklopa pod tlak [2].



Slika 1. Adhezijske i kohezijske veze u lijepljenom spoju [3]

Ljepila imaju mnoge normirane podjele, ali najvažnija podjela ljepila je prema DIN EN 923:2015 normi. Prema njima se ljepila dijele u dvije glavne skupine [4]:

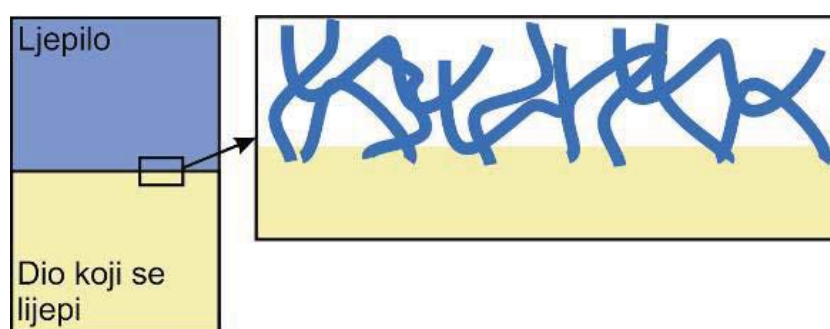
- **fizikalno veziva ljepila**, koja predstavljaju u organskim otapalima (pretežno ugljikovodicima) otopine prirodnih ili umjetnih makromolekularnih materijala (kaučuk, umjetne smole). Princip lijepljenja se kod njih ostvaruje na temelju ishlapljenja otapala iz ljepila vezanjem za okolni zrak. Da bi se ovaj proces ostvario potrebna je velika površina isparavanja, odnosno poroznost osnovnog materijala. Zato se ova ljepila ne upotrebljavaju za lijepljenje metala već više za porozne nemetale (koža, guma, drvo, plastika). Dije se u tri podskupine: kontaktne, taljive i plastične.

- Kontaktna ljepila se sastoje od kaučuka i smole otopljene u nekom organskom otapalu. Nanose se na obje površine koje se lijepe, zatim se pričekava da ishlapi otapalo, a potom se površine koje se lijepe čvrsto pritisnu jedna na drugu.
- Taljiva ljepila se prije primjene moraju zagrijati na 150°C do 200°C da bi postala tekuća, jer su pri sobnoj temperaturi u čvrstom stanju. Nakon lijepljenja dijelovi moraju ostati u stanju mirovanja do hlađenja na sobnu temperaturu, kada dostižu potrebna mehanička svojstva.
- Plastična ljepila su napravljena na bazi PVC praha pomiješanog s omekšivačem, punilom i adhezijskim sredstvom. Za razliku od kontaktnih i taljivih ljepila, plastična ne sadrže otapala. Primjenjuju se tako da se zagriju na oko 150°C kada prelaze u tjestasto, gumeno stanje te se nanose na jednu od površina koje se lijepe.
- **kemijski veziva ljepila**, koja se još zovu reakcijska ljepila, predstavljaju tehnički važnija ljepila od fizikalno vezivih, jer se uglavnom ona koriste za spajanje metala. Napravljena su na bazi epoksida, poliuretana, fenola, akrila te poliestera kao umjetne smole. Neophodni sastojci ovih ljepila su takozvani katalizatori koji imaju zadatak izazvati kemijsku reakciju koja će dovesti do stvaranja makromolekularnih mreža polimera, a koje će nastati nakon miješanja bazne smole i katalizatora (zbog toga se zovu i dvokomponentna) pod utjecajem temperature, vlage ili pod djelovanjem UV zraka. Obzirom da neki od postupaka mogu trajati dugo (danima) ponekad se ljepilima dodaje i treće komponenta, ubrzivač. Općenito se pod utjecajem temperature (do 200°C) postižu bolji rezultati nego kod hladnih postupaka ali je postupak nepraktičan za veće izratke ili ako je jedan od materijala koji se lijepi osjetljiv na povišene temperature. Reakcijska ljepila se dijele osim na hladna i topla još i na:
 - polimerizacijska (jedno ili dvokomponentna). Polimerizacija se pospješuje katalizatorom. Kod anaerobnih ljepila katalizator je u tekućem ljepilu neaktivan sve dok je u doticaju s kisikom u okolnom zraku. Brzina reakcije katalizatora se regulira njegovom količinom u ljepilu, kao i temperaturom okoline i izratka;
 - poliaditivna (jedno ili višekomponentna), sastoje se od minimalno dvije različite međusobno reagirajuće komponente koje se miješaju u određenom stehiometrijskom odnosu. Osnovu ljepila čine epoksid ili poliuretan;
 - polikondenzacijska ljepila lijepe se na taj način da je potrebno eliminirati tekuću primjesu iz ljepila pod djelovanjem pritiska od oko 0,5 N/mm² i temperaturi oko 150°C, a lijepljenje se temelji na tekućoj fazi smole fenola i čvrstoj fazi polivinilformala.

2.2. Mehanizam lijepljenja

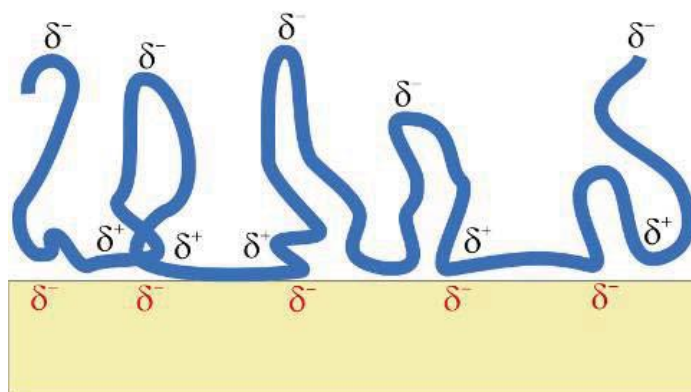
Brojne su vrste ljepila i materijala tijela koja se mogu lijepiti, pa zbog toga mnoštvo njihovih specifičnih svojstava, te postupaka lijepljenja ne dopuštaju konstrukciju jedinstvene teorije o adhezijskim silama pri lijepljenju. Zbog toga često dolazi do razlike između izračunate teorijske vrijednosti čvrstoće zalijepljenog spoja s rezultatima mjerenja u praksi. Glavne poteškoće u razvijanju opće teorije lijepljenja čini nepristupačnost izravnom mjerenju adhezije (jer je to zapravo međudjelovanje na graničnim površinama), te teško određivanje prirode tih površina, pa se za polazišta pri tom upotrebljavaju različite pretpostavke. Zbog toga postoje mnogobrojne teorije lijepljenja, no međutim, nijedna od njih potpuno ne objašnjava adheziju. Može se zaključiti da je prijanjanje ljepila na površinu dijela koji se lijepi rezultat mehaničkih, fizikalnih i kemijskih sila koje se preklapaju i utječu jedna na drugu. Među principe adhezije spadaju [23]: difuzija, elektrostatičko povezivanje, kemijsko povezivanje, mehaničko sidrenje i dr.

Ostvarivanje veze difuzijom molekula polimera u površinu dijelova koji se lijepe prikazano je na slici 2. Difuzija molekula zahtijeva gibanje polimernih lanaca ljepila i mora biti osigurana kompatibilnost ljepila i materijala dijela koji se lijepi. Činitelji koji utječu na proces difuzije su: vrijeme dodira, temperatura, masa molekule polimera (ljepila) i stanje polimera (ljepila). Treba napomenuti da ostvarivanje veze difuzijom nije moguće u slučajevima kada ne postoji kompatibilnost ljepila i materijala dijela koji se lijepi (polimer) ili kada je gibanje molekularnih lanaca ograničeno ili onemogućeno (npr. gusto umrežena struktura).



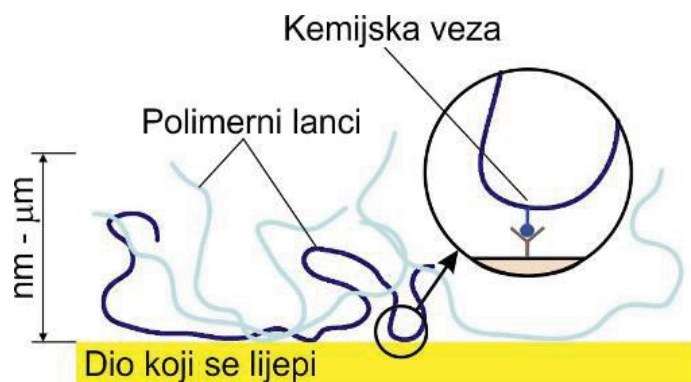
Slika 2. Proces difuzije [23]

Elektrostatička teorija objašnjava da zbog razlike u elektronegativnosti (slika 3) između ljepila i materijala dijela koji se lijepi dolazi do stvaranja elektrostatičkih sila koje svojim djelovanjem doprinose čvrstoći lijepljenog spoja. Npr., pri spoju organskog polimera i metala dolazi do prijenosa elektrona iz metala u polimer i do stvaranja tzv. duplog električnog sloja – „electrical double layer.“



Slika 3. Elektrostatičko povezivanje [23]

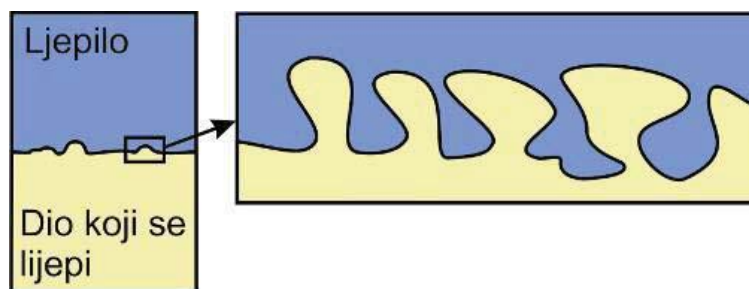
Kemijsko povezivanje ljepila i površine dijelova objašnjava se stvaranjem primarnih kemijskih veza duž površine dodira, što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Kemijsko povezivanje [23]

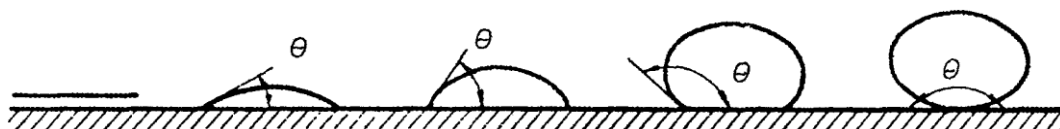
Mehaničko sidrenje se objašnjava ulaskom ljepila u pore, udubine i u ostale nepravilnosti površine. Time se ostvaruje mehaničko povezivanje ljepila i površine tijela mehaničkim sidrenjem (slika 5). Da bi došlo do mehaničkog sidrenja, moraju biti zadovoljena dva uvjeta:

- Ljepilo mora dobro kvasiti površinu dijela,
- Ljepilo mora biti dovoljno niske viskoznosti da može lagano popuniti šupljine i iz njih istisnuti zrak.



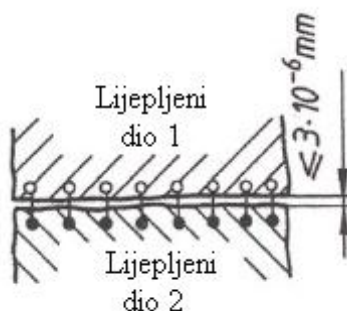
Slika 5. Mehaničko sidrenje [23]

Lijepljenje je načelno jednostavno: ljepilo se nanese na površine koje treba zalijepiti, pa se nakon nekog vremena uspostavi kontakt tih površina pod tlakom, koji se održava do očvršćivanja ljepila. Pri nanošenju ljepila na površine tijela koje se spajaju bitno je što bolje kvašenje. Kvašenje je mjera privlačnosti između tekućine (u ovom slučaju ljepila) i površine materijala. Da bi kvašenje bilo potpuno, kontaktni kut θ mora biti 0° , što se osigurava dovoljno malenom viskoznošću ljepila. Na slici 6 su prikazani kontaktni kutovi različitih veličina.



Slika 6. Kontaktni kut kod kvašenja [5]

U idealiziranom bliskom kontaktu savršeno glatkih površina metalnih tijela (molekularnom kontaktu) mogu među tim površinama nastati znatne privlačne sile ($10^8 \div 10^9 \text{ N/m}^2$), među kojima su osobito jake Londonove disperzijske sile (slika 7). Međutim, takvo spajanje praktično ne dolazi u obzir, jer realne površine nisu ni savršeno glatke ni savršeno čiste [2].



Slika 7. Londonove disperzijske sile [6]

Da bi se lijepljeni spoj stavio u upotrebu, potrebno je pričekati da se ljepilo stvrdne u potpunosti.

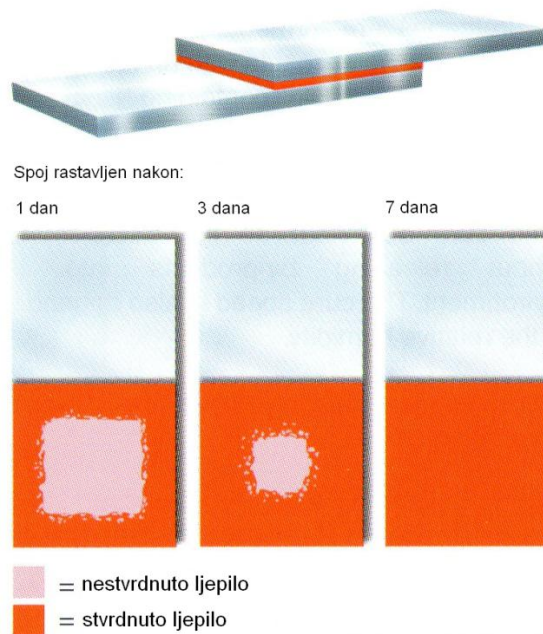
Postoje razni mehanizmi stvrdnjavanja ljepila među kojima su:

- stvrdnjavanje anaerobnim reakcijama,
- izloženost UV zračenju,
- stvrdnjavanje anionskim reakcijama,
- stvrdnjavanje aktivatorima,
- stvrdnjavanje posredstvom vlage,
- stvrdnjavanje posredstvom topline.

Ljepila koja stvrdnjavaju posredstvom aktivatora su najčešće dvokomponentna ljepila i najzanimljivija su iz razloga što se često koriste zbog jednostavnosti primjene.

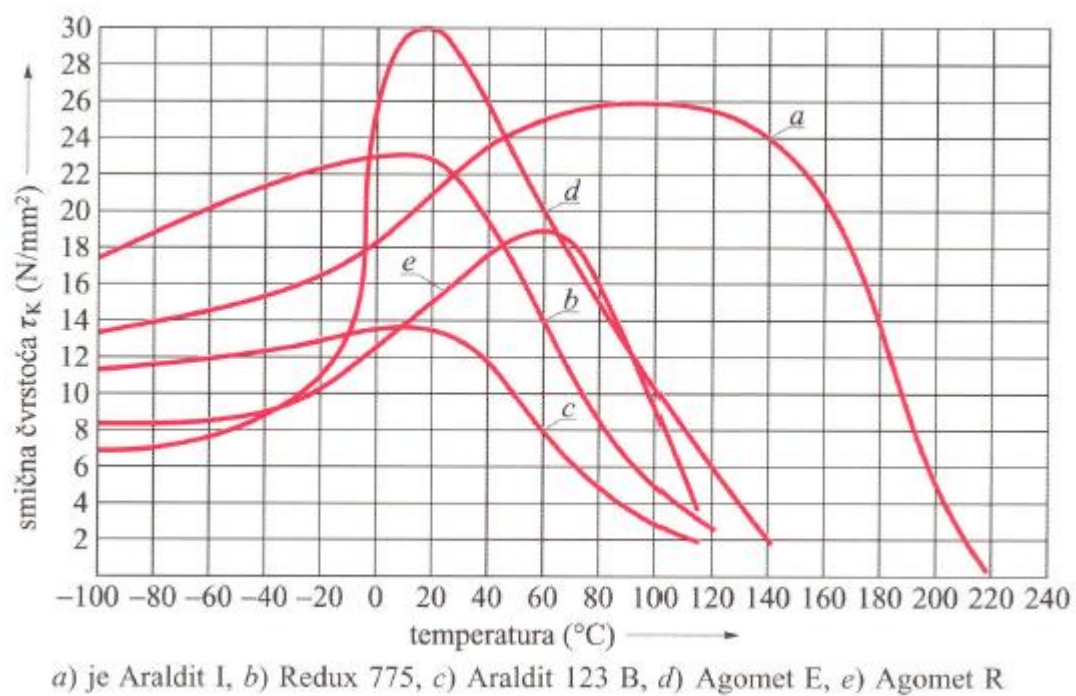
Čvrstoća lijepljenog spoja ovisi o vremenu stvrdnjavanja spoja, te o temperaturi stvrdnjavanja i temperaturi spoja u eksploataciji. Na slici 8 je prikazano potrebno vrijeme stvrdnjavanja ljepila (silikonski elastomer). Ukoliko se lijepljeni spoj koji se nije stvrdnuo do kraja, stavi u upotrebu i izloži naprezanjima, postoji velika mogućnost da spoj neće zadovoljiti uvjete eksploatacije i da će doći do pucanja spoja.

Lijepljeni spojevi su podložni promjenama mehaničkih svojstava ovisno o vremenu koje je proteklo u eksploataciji bez obzira na opterećenja. Taj proces je poznat pod pojmom „efekt starenja ljepila“. Čak i nakon dugotrajnog skladištenja lijepljenih spojeva, bez ijednog primjenjenog opterećenja, taj efekt se ne može izbjeći. Koliko će taj proces biti brz zavisi prije svega o vrsti ljepila, stanju površine prije lijepljenja, te okolini u kojoj se nalazi lijepljeni spoj.



Slika 8. Vrijeme stvrdnjavanja ljepila [8]

Na slici 9 prikazan je utjecaj temperature u eksploataciji na čvrstoću lijepljenog spoja. Teoretski na temperaturama iznad 300 °C, smatra se da nijedno ljepilo više ne djeluje, a u praksi su to još niže temperature.



Slika 9. Smična čvrstoća raznih ljepila ovisno o temperaturi [3]

U tablici 1 dana je ovisnost smične čvrstoće u odnosu na temperaturu okoliša tijekom eksploatacije.

Tablica 1. Ovisnost smične čvrstoće lijepljenog spoja o temperaturi okoliša [4]

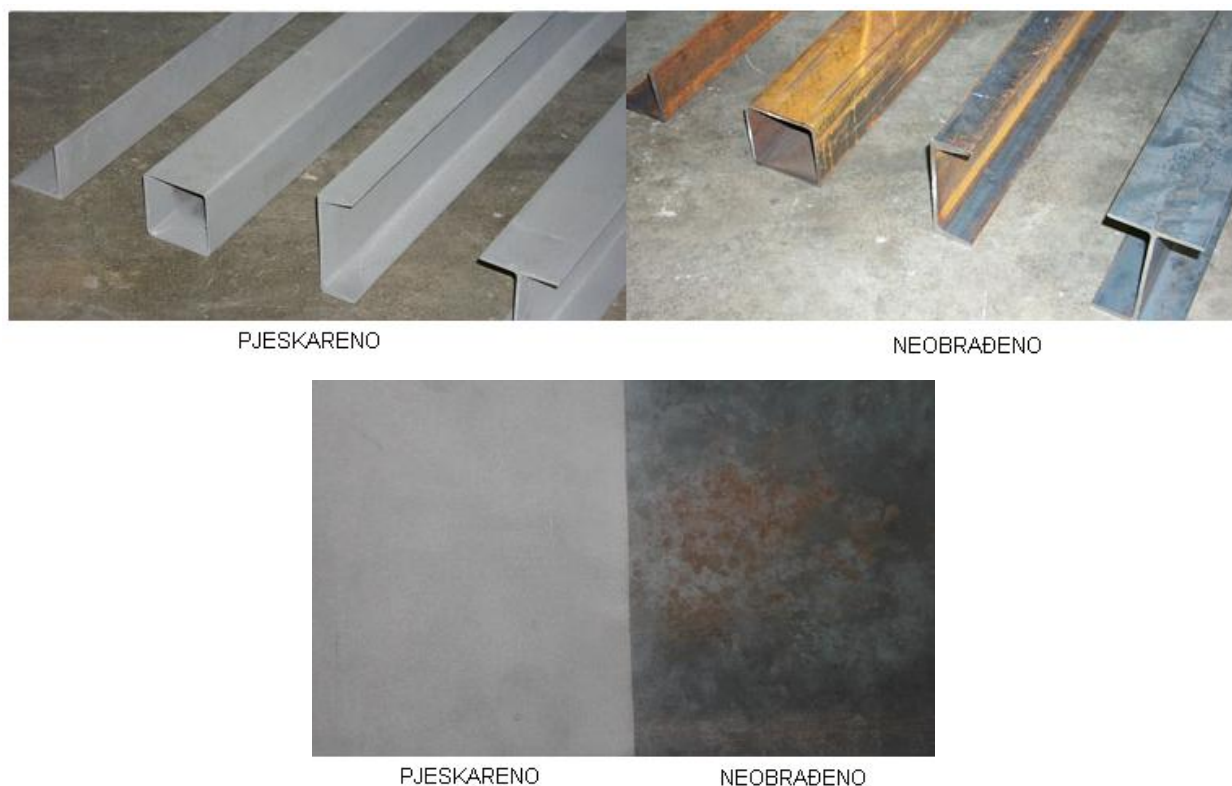
Proizvođač	Trgovački naziv	Temperatura stvrdnjavanja [°C]	Debljina sloja ljepila [mm]	Smična čvrstoća spoja τ u N/mm ² pri °C					
				-25	25	55	80	105	155
Ciba-Geigy	Araldit	150...200	0,05...0,1	32	32	32	30	17	2
	AV8 AW142	150...180	0,1...0,2	23	25	26	26	26	20
Henkel	Metallon E2701	180	0,05...0,3	20	31	30	29	28	9
	E2706	180	0,05...0,3	30	32	31	30	23	6
	Macroplast PV8621	165...180	0,1...5	5	2	0,8	0,6	-	-
	PV8625	160...180	0,1...5	14	6	2	1,6	-	-
Baiersdorf AG	Technicol 1 8280	150...200	-	36	39	41	42	36	15
	8282	120...150	-	-	40	39	27	11	
Th.Goldschmidt	Tegocoll M12F/6	iznad 130	0,1	-	26	-	-	-	-
	D02/PVF	iznad 130	0,15	32	35	25	14	8	-
Loctite	Loctite	do 120	0,1	-	23	22	18	14	5
	306	do 120	0,2		10	10	10	10	9
	317	do 120	0,1		35	29	19	12	7

Spojevi sastavljeni od aluminijskih dijelova daju najveće čvrstoće, a slijede ga spojevi od čelika, bakra i mjedi. Sloj ljepila trebao bi biti što tanji, teorijski bi trebao biti jednak debljini molekula, jer su adhezijske sile u većini slučajeva veće od kohezijskih sila. Najviša čvrstoća se postiže slojem ljepila debljine 0,1 do 0,3 mm, a pri debljini sloja ljepila do 1mm, čvrstoća pada na približno 60%. Razlog tome leži u činjenici da se prilikom stvrdnjavanja ljepilo skuplja, te nastaju unutarnje napetosti koje su to veće što je debljina sloja ljepila veća. Čvrstoća se također smanjuje tijekom vremena i zbog starenja ljepila, a zaustavlja se negdje kod 70 do 80% početne čvrstoće [3].

2.3. Priprema lijepljenih spojeva


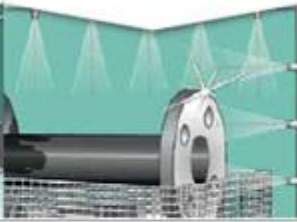
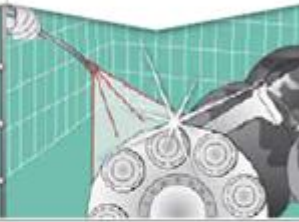
Od izvanrednog značenja za izdržljivost spoja je stanje površine koja se lijepi. Adhezijske sile samo su onda djelotvorne ako je površina prijanjanja čista, ohrapavljena i odmaštena. Hrapavljenje povećava površinu prijanjanja stvaranjem udubljenja i uzvišenja. Površine metala ohrapavljaju se finim četkanjem, brušenjem, pjeskarenjem ili sačmarenjem, a čiste i odmašćuju trikloretilenom, perkloretilenom ili ugljičnim tetrakloridom (izložene djelovanju pare ili uronjene u paru), te acetonom ili lužinama (uronjeno). Površine obrađivane silikonskim pastama ili sredstvima više se ne mogu lijepiti [3].

Pjeskarenjem se dobiva veoma prikladna površina za lijepljenje, koja u praksi daje jako dobre rezultate kod ispitivanja čvrstoće spoja. Pjesak promjera 0,15 do 0,25 mm se velikom brzinom (između 80 i 100 m/s) pomoću komprimiranog zraka izbacuje i udara o površinu obratka, čime se uklanjaju nečistoće, hrđa, te se postiže ujednačena hrapavost. Ra, srednje aritmetičko odstupanje površine nakon pjeskarenja iznosi približno oko 2,5 μm . Na slici 10 su prikazane površine neobrađenih, korodiranih čelika, te površine nakon pjeskarenja.



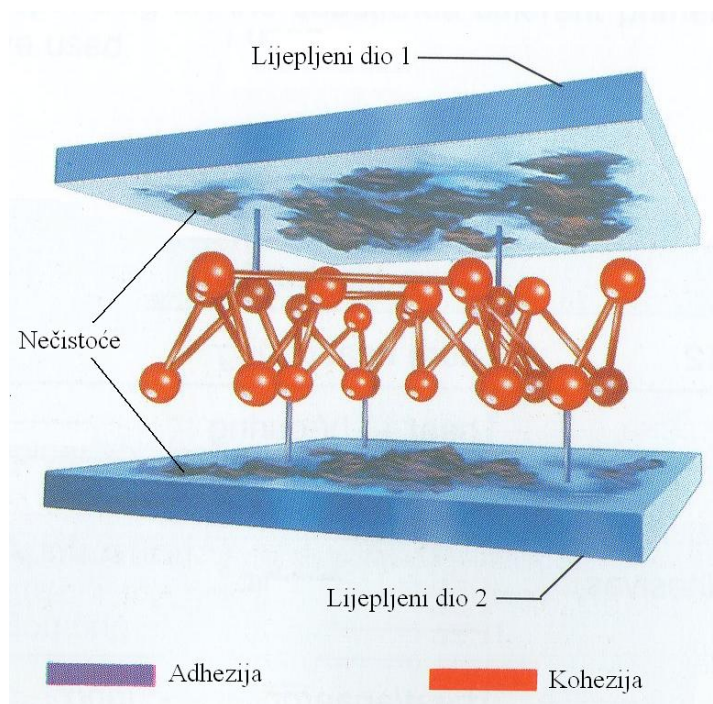
Slika 10. Površine pjeskarenih čelika i neobrađenih čelika [14]

Osim ranije navedenih sredstava za čišćenje i odmašćivanje, moguće je koristiti i neka komercijalna sredstva u obliku spreja, visokotlačnog prskanja ili običnog prskanja. Na slici 11 su prikazana takva sredstva.

Bonderite C-MC 1030 poznat pod nazivom Loctite® 7013	Bonderite C-MC 352 poznat pod nazivom Loctite® 7014	Bonderite C-MC 3000 poznat pod nazivom P3 Grato 3000
Sredstvo za čišćenje prskanjem	Sredstvo za čišćenje u spreju	Visokotlačno čišćenje
		
Sobna temperatura	+50 do +75	+10 do +50
<ul style="list-style-type: none"> • Za sve vrste zaprljanja • Ne sadrži otapala • Biorazgradivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Za prljavštinu, ulje i mast • Za strojeve za mlazno čišćenje • Ne sadrži otapala 	<ul style="list-style-type: none"> • Za prljavštinu, ulje i mast • Privremeno štiti od hrđe • Ne sadrži otapala • Biorazgradivo

Slika 11. Sredstva za čišćenje i odmašćivanje površina [11]

Na slici 12 prikazan je utjecaj nečistoća na lijepljeni spoj. Ukoliko spoj nije pravilno očišćen i na sebi ima prisutne masti, ulja, hrđu ili drugu prljavštinu, ljepilo se ne može povezati s osnovnim materijalom, tj. adhezijske veze se ne mogu formirati, te je čvrstoća spoja značajno manja nego kod pravilno očišćenog lijepljenog spoja. U tom slučaju vrlo vjerojatno će doći do adhezijskog loma, tj. jedan dio ili cijela strana lijepljenog spoja će se u potpunosti odlijepiti, što je nedopustiva greška.



Slika 12. Utjecaj nečistoća na adheziju i čvrstoću spoja [8]

Da bi se postigla bolja adhezijska svojstva, moguće je materijal i kemijski obraditi. Takva obrada ne mijenja samo fizička svojstva površine, nego i kemijska svojstva. Cilj kemijske obrade je uklanjanje pasivnog filma na osnovnom materijalu (najčešće na nehrđajućem čeliku ili visokolegiranom čeliku). Pasivni film je tanka nakupina oksida koja štiti materijal od korozije. Okside stvaraju legirni elementi koji se dodaju čeliku, npr. krom ili titan. Pasivni sloj od kromovog oksida na nehrđajućem čeliku je prikazan na slici 13.



Slika 13. Pasivni sloj na nehrđajućem čeliku [12]

U svrhu kemijskog čišćenja koriste se razne kemikalije i lužine. Najčešće se određena kemikalija, lužina ili mješavina istih stavlja u kadu, koja se potom zagrijava na potrebnu temperaturu te se metal uranja u nju i drži određeno vrijeme. Nakon što se metal kemijski obradi, on se vadi iz kade, ispiru, te suši u posebnim pećima [7]. U tablici 2 su dane upute za kemijsku obradu najčešće korištenih metala.

Tablica 2. Upute za kemijsku obradu različitih metala prije lijepljenja [7]

Osnovni materijal	Komponente otopine	Maseni udio komponente (%)	Vrijeme i temperatura obrade
Aluminij	Destilirana voda Sumporna kiselina Natrijev dikromat	68,83 24,51 6,66	Uranjanje: 20 min / 25°C Ispiranje: Vodovodna voda, zatim destilirana voda Sušenje: 30 min / 70°C
Bakar	Dušična kiselina Željezov klorid Destilirana voda	12,4 6,2 81,4	Uranjanje: 1-2min / 21-32°C Ispiranje: Vodovodna voda, zatim destilirana voda Sušenje: 30 min / 65°C max
Nehrđajući čelik	Dušična kiselina Destilirana voda	20 80	Uranjanje: 25-35 min / 21-32°C Ispiranje: Vodovodna voda, zatim destilirana voda Sušenje: 30 min / 65°C max
Konstrukcijski čelik	Etanol Ortofosforna kiselina (85%)	66,7 33,3	Uranjanje: 10 min / 60°C Ispiranje: Vodovodna voda, zatim destilirana voda Sušenje: 60 min / 120°C
Titan	Dušična kiselina Fluorovodična kiselina Destilirana voda	28,8 3,4 67,8	Uranjanje: 10-15 min / 38-52°C Ispiranje: Vodovodna voda, zatim destilirana voda, tijekom ispiranja s najlonskom četkom se uklanja zaostali ugljik Sušenje: 15 min / 70-80°C

2.4. Nanašanje ljepila

Ljepilo se može nanijeti na obje strane lijepljenog spoja ili samo na jednu stranu. To ovisi o vrsti ljepila. Za nanošenje ljepila koristi se razna oprema: kistovi, ručni aplikatori, ručni sustavi za nanošenje, poluautomatski sustavi za nanošenje, automatski sustavi, roboti te dodatna oprema kao oprema za UV stvrdnjavanje, itd. Na slici 14 su prikazani ručni sustavi za nanošenje ljepila.



Slika 14. Oprema za ručno nanošenje ljepila [15]

Kod dvokomponentnih ljepila proizvođač uvijek navede točan omjer miješanja svake komponente, kojeg se treba pridržavati ukoliko se želi postići maksimalna čvrstoća spoja. Roboti, poluautomatska i automatska oprema za nanašanje ljepila (slika 15) je razvijena da bi omogućila precizno nanašanje ljepila, te samim time i ujednačenija svojstva lijepljenog spoja. Takva oprema ima ugrađen precizni regulator pritiska koji osigurava konstantni pritisak, te digitalni softver koji mjeri vrijeme i temperaturu te ima mogućnost različitih načina (modaliteta) za nanašanje ljepila. Može se koristiti način u kojem se nanašaju kapljice ljepila, periodične isprekidane linije ljepila, ili kontinuirana linija.



Slika 15. Poluautomatski uređaj i robot za nanašanje ljepila [16]

2.5. Oblikovanje lijepljenih spojeva

Pravila oblikovanja lijepljenih spojeva dosta su slična onima koji vrijede za lemljene spojeve. Međutim sama tehnologija lijepljenja je složenija i osjetljivija na greške. Izbor ljepila zavisi o vrsti materijala koji se lijepi, zahtijevanoj čvrstoći spoja, vanjskim utjecajima na spoj kao što su temperatura, vlaga, korozija itd. Obzirom da odlučujuću ulogu na svojstva ljepila imaju podaci koji daju proizvođači ljepila izložiti će se samo neka opća pravila oblikovanja koja bitno utječu nosivost lijepljenog spoja [3].

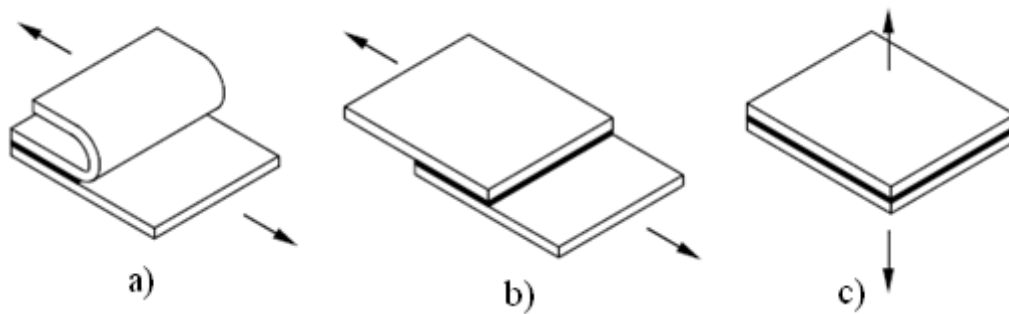
Budući da su vlačna i smična čvrstoća lijepljenog spoja bitno ispod one kod metala, potrebna je razmjerno velika površina lijepljenja. Najpovoljnijom duljinom lijepljenja pokazala se duljina $l = 15 \div 25$ s. To je prikazano na slici 16.



Slika 16. Lijepljeni preklopni spoj limova, A - površina lijepljenog spoja, l - duljina, s - debljina lima [3]

Lijepljene spojeve treba oblikovati tako da su po mogućnosti izloženi smičnom naprezanju. Preporuke za oblikovanje lijepljenih spojeva dane su u tablici 3. Kao dopušteno naprezanje uzima se oko 30% do 50% lomne čvrstoće lijepljenog spoja. U obzir se treba uzeti i radna temperatura, kao i različito ponašanje različitih vrsta ljepila. Kod hladnih ljepila u većoj mjeri pada čvrstoća spoja na višim pogonskim temperaturama nego kod toplih ljepila. Proračune lijepljenih spojeva treba shvatiti samo kao približne odrednice, s obzirom na to da se stvarne vrijednosti čvrstoća mogu bitno razlikovati. Preporuča se prije svake primjene u industriji obaviti eksperimente i utvrditi stvarne vrijednosti čvrstoće spoja.


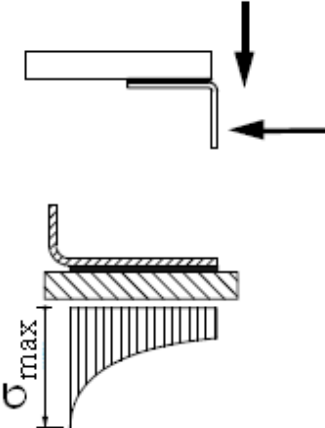
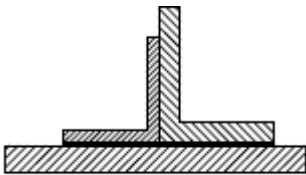
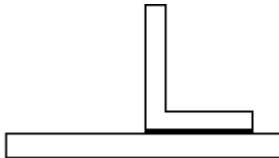
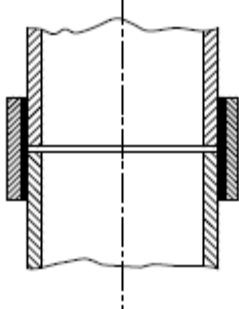
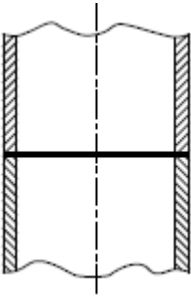
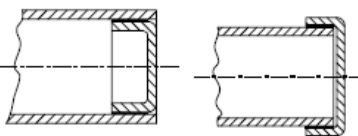
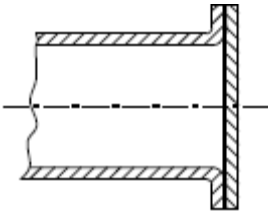
Lijepljeni spojevi se nikako ne bi smjeli oblikovati tako da dođe do ljuštenja lijepljenog spoja, ili da spoj bude napregnut vlačno. Na slici 17 je jedini ispravno oblikovani spoj onaj u sredini, napregnut na smična naprezanja.



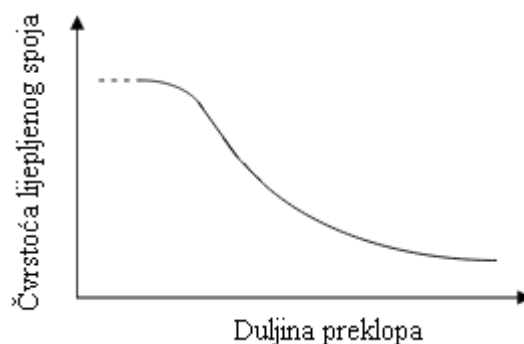
Slika 17. a) Ljuštenje spoja, b) smično napregnuti spoj i c) vlačno napregnuti spoj [4]

Tablica 3. Preporuke za oblikovanje lijepljenih spojeva [4]

Povoljno ili povoljnije	Nepovoljno	Opaska
<p>a) b) c) d)</p>		<p>Sučeonni spojevi su nepoželjni. Ako su neophodni, površina i način opterećenja se mijenjaju kao na prikazu pod a). Povoljniji su preklopni spojevi pod b), te naročito sa skošenim rubovima pod c). Kod većih debljina oblikovati kao pod d) (smanjen utjecaj savijanja)</p>
<p>a) b) c)</p>		<p>Listanje ili ljuštenje lijepljenog spoja može se spriječiti: a) ojačanjem b) oblikom (npr. zakovicom) c) povećanjem površine na kraju spoja.</p>
		<p>Spoj u odnosu na opterećenja oblikovati tako da se optereti pretežno na smik</p>

Povoljno ili povoljnije	Nepovoljno	Opaska
		Na slici desno se u oba smjera djelovanja sila javlja velika koncentracija naprezanja na desnoj strani spoja. Zato je bolje da se dio opterećenja prenese oblikom.
		Spojevi s kutnicima kod svake vrste opterećenja izazivaju koncentraciju naprezanja na krajevima lijepljenog spoja, pa ih je potrebno ojačati.
		Cijevni sučeoni spojevi kao i ostali sučeoni spojevi su nepovoljni. Bolja je izvedba s cijevnom stičnicom.
		Oblikovanje dna spremnika treba tako izvesti da je lijepljeni spoj opterećen na smik.

Važno je napomenuti da kod preklopnih spojeva čvrstoća spoja opada, ukoliko je duljina lijepljenog spoja veća od optimalne. To je prikazano je slici 18.



Slika 18. Utjecaj duljine preklopa na čvrstoću spoja [25]

2.6. Naprave za učvršćivanje lijepljenog spoja tijekom stvrdnjavanja

Tlačenje sastavljenog spoja provodi se pomoću različitih preša, stega i naprava za stezanje. Za dovođenje topline i održavanje temperature pri stvrdnjavanju ljepila upotrebljavaju se peći s cirkulacijom vrućeg zraka, uređaji za kontaktno grijanje (npr. grijane preše), rjeđe uređaji za mikrovalno ili induktivno grijanje.

Stega za lijepljenje je pomoćni uređaj koji se zasniva na vijku koji uzrokuje elastičnu deformaciju svinutog dijela stega. Ako se prilikom lijepljenja smanji debljina zalijepljenog dijela, smanjuje se i deformacija svinutog dijela stega. Na taj se način smanjuje tlačenje sastavljenog spoja. Isto se događa pri upotrebi stega za lijepljenje sa zagrijavanjem, tj. kada se u stezi stegne sastavljeni spoj, te se zatim sve stavi u peć. Ovdje treba paziti na toplinsku deformaciju svinutog dijela stega. Temperaturne promjene mogu uzrokovati gubitak pritiska stezanja stega. Ovaj problem se rješava upotrebom stega s tanjurastim oprugama, koje imaju velike sile tiskanja. [26]

Ujednačenu temperaturu i tlak je teško održavati na istoj vrijednosti prilikom procesa stvrdnjavanja ljepila upotrebom preše. Zbog toga se koristi autoklav. To je uređaj u kojem se postiže potrebni tlak i temperatura, te se koristi u više svrha (sterilizacija medicinske opreme, namirnica ili za postizanje i održavanje prikladnih uvjeta prilikom stvrdnjavanja ljepila).



Slika 19. Autoklav [27]

2.7. Usporedba tehnologije lijepljenja s tehnologijom zavarivanja

U načelu su tehnologije lijepljenja i zavarivanja slične. Kod obje tehnologije spoj se nerastavljivo spaja, ali ako se pogleda primjena ovih tehnologija u praksi, dolazi se do zaključka da se točno zna u kojim slučajevima se pojedina tehnologija koristi. Lijepljenje u nekim segmentima nadmašuje ostale tehnologije spajanja, no svakako postoji mnogo ograničavajućih čimbenika za uporabu lijepljenja kao načina spajanja materijala.

Nepoznavanje djelovanja eksploatacijskih uvjeta na čvrstoću lijepljenih spojeva vjerojatno je jedan od najznačajnijih. U razvijenim zemljama svijeta vršena su brojna istraživanja o utjecaju eksploatacijskih uvjeta na čvrstoću lijepljenih spojeva, no, do danas nije razvijena teorija koja bi zadovoljavajuće opisala ponašanje lijepljenog spoja tijekom uporabe. Slabljenje adhezijskim sila lijepljenih spojeva tijekom uporabe samo je djelomično razjašnjeno [9].

Niske vrijednosti čvrstoće spoja također su razlog rijetkog korištenja tehnologije lijepljenja. Lijepljeni spoj gotovo uvijek ima slabija mehanička svojstva od osnovnog materijala, dok zavareni spojevi moraju zadovoljavati uvjet da imaju bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala.

Proračun čvrstoće lijepljenih spojeva također nije u potpunosti razjašnjen te je stoga teško odrediti dopuštena naprezanja i sile kojima bi lijepljeni spoj bio opterećen, stoga projektanti često izbjegavaju lijepljene spojeve.

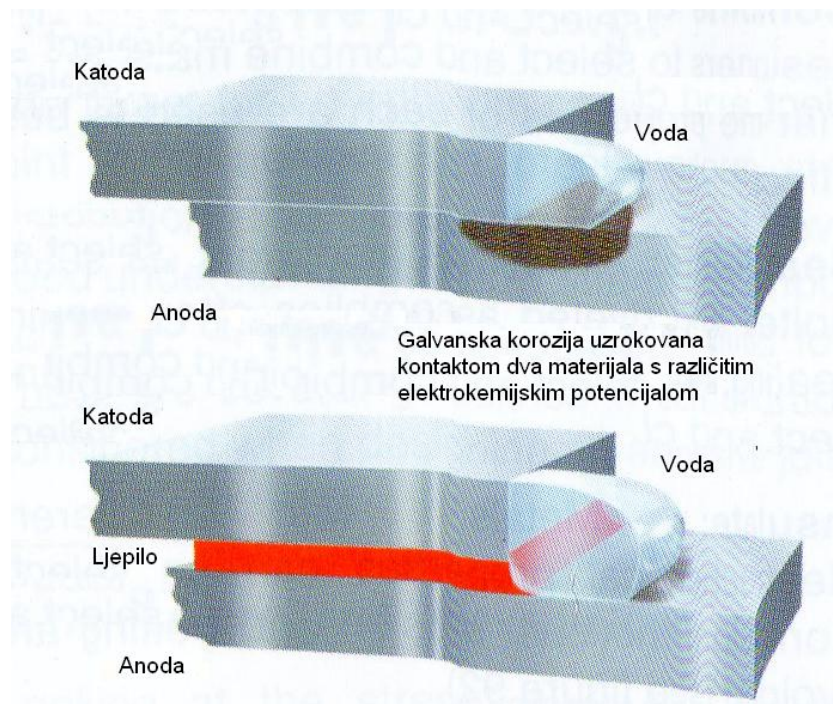
Tehnologija zavarivanja s druge strane, nema nijedan od tih problema. Čvrstoća zavara se može relativno jednostavno izračunati preko jednostavnih formula, te se izračunati podaci uglavnom poklapaju s izmjerenim podacima u eksperimentu.

Međutim, unatoč svim nedostacima kod tehnologije lijepljenja, ona je u mnogim situacijama neizostavna tehnologija, bez koje ne bi bilo moguće kvalitetno napraviti proizvod. U tablici 4 dana je usporedba tehnologije lijepljenja i zavarivanja, njihove prednosti i nedostaci.

Tablica 4. Usporedba tehnologija lijepljenja i zavarivanja

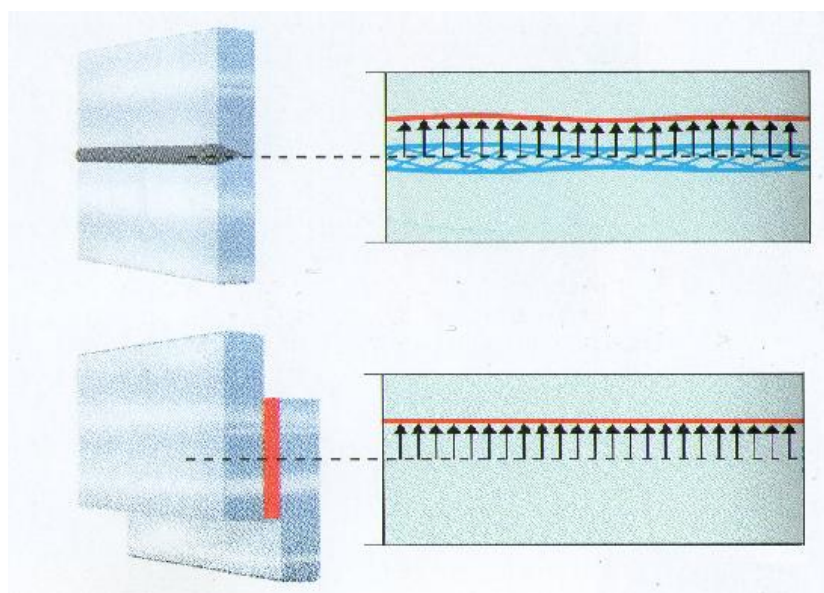
Lijepljenje	Zavarivanje
Neprecizan i složen izračun čvrstoće lijepljenog spoja	Precizan i jednostavan izračun čvrstoće zavara
Jednostavna primjena bez obzira na broj različitih materijala koji se spajaju u jednom spoju	Nemogućnost ili velika složenost primjene kod spajanja više različitih materijala u jednom spoju
Mala čvrstoća spoja zbog čega je tehnologija lijepljenja ograničena	Velika čvrstoća spoja zbog čega je tehnologija zavarivanja rasprostranjena u svim granama industrije te među velikim rasponom proizvoda
Odlična svojstva kod brtvljenja te odlična antikorozivna svojstva	Čest uzrok korozije (interkristalna korozija, korozija u procijepu), vodikova bolest
Nema unošenja topline (eventualno malo unošenje) te shodno tome nema ni nepoželjnih promjena u mikrostrukтури	Veliko unošenje topline, promjene u mikrostrukтури (martenzit), unošenje nečistoća u osnovni materijal
Pogodan za primjenu kod laganih i tankih konstrukcija	Nepogodan za tanke limove i materijale
Prigušuje vibracije	Prenosi vibracije
Nakon određenog vremena gubi mehanička svojstva i potrebna je reparatura	Zadržava mehanička svojstva bez obzira na dužinu vremena provedenog u eksploataciji
Nije pogodno za korištenje u morskoj atmosferi	Pogodno za korištenje u morskoj atmosferi
Nije pogodno za korištenje na visokim temperaturama	Pogodno za korištenje na visokim temperaturama

Na slici 20 prikazana je galvanska korozija kod zavarenih, zakovicama ili vijcima spojenih konstrukcija, te zaštita od galvanske korozije upotrebom ljepila. Galvanska korozija nastaje prilikom kontakta dva metala različitog elektrokemijskog potencijala, što se najčešće događa kod vijčanih i zakovičnih spojeva. U tome slučaju neplemenitiji metal se ponaša kao anoda i počinje se trošiti (otapati). Kod lijepljenih spojeva ne dolazi do galvanske korozije jer je između dva različita metala sloj ljepila koji onemogućuje kontakt metala.



Slika 20. Galvanska korozija kod spojeva [8]

Na slici 21 je pokazana razlika između rasporeda naprezanja kod zavarenog spoja te kod lijepljenog spoja. Jasno se vidi da je naprezanje kod lijepljenog spoja jednoliko raspoređeno po cijeloj dužini, zbog jednolikog sloja ljepila. Kod zavarenog spoja dolazi do nejednolikog rasporeda naprezanja po dužini jer je nemoguće napraviti savršeno jednolik zavar.

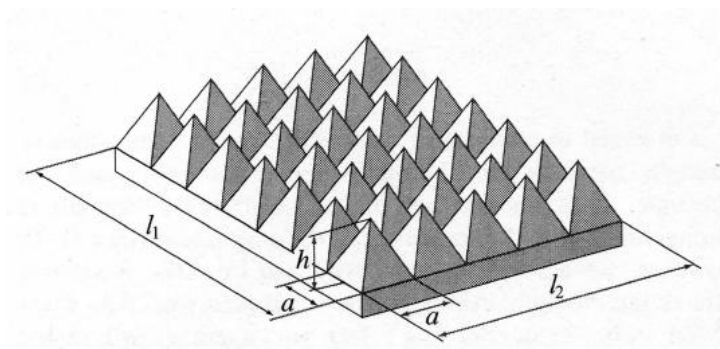


Slika 21. Usporedba naprezanja kod zavarenog i lijepljenog spoja [8]

2.8. Parametri koji utječu na čvrstoću spoja

Na čvrstoću lijepljenog spoja utječu mnogi parametri, među kojima su hrapavost i čistoća površine, geometrijski čimbenici lijepljenog spoja (dužina preklopa, širina preklopa, debljina lijepljenih dijelova, debljina sloja ljepila), vrsta ljepila, eksploatacijski uvjeti, itd.

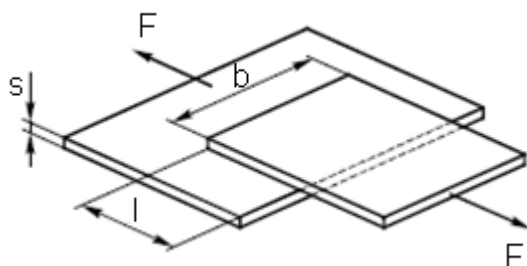
Što ima više adhezijskih veza, to je čvrstoća lijepljenog spoja veća. Što je veća površina na koju ljepilo prijanja, to ima više adhezijskih veza. Stoga se dolazi do zaključka da je za najveću čvrstoću spoja potrebna što veća površina prijanjanja ljepila, koja se postiže pravilnim ohrapljivanjem površine. Idealno hrapava površina bi trebala biti formirana od puno piramida (slika 22).



Slika 22. Idealno hrapava površina [13]

Napravljena su brojna istraživanja o utjecaju duljine preklopa lijepljenog spoja i debljine sloja ljepila i lijepljenog spoja na čvrstoću spoja. Preporuča se da duljina lijepljenog spoja bude 15-25 puta veća od debljine lijepljenog dijela (1). Primjer lijepljenog spoja je prikazan na slici 23.

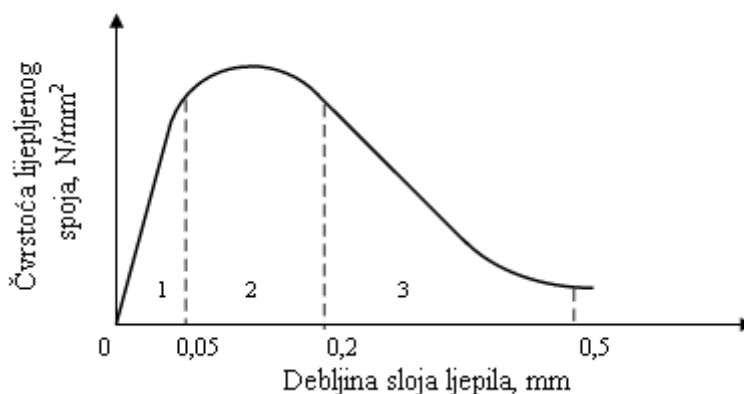
$$l = (15 \div 25) \times s \quad (1)$$



F - sila (kN)
b - širina preklopa (mm)
l - duljina preklopa (mm)
s - debljina osnovnog materijala (mm)

Slika 23. Odnos duljine lijepljenog spoja i debljine osnovnog materijala [4]

Na slici 24 je prikazan utjecaj debljine sloja ljepila na čvrstoću lijepljenog spoja. U području 1 dolazi do povećanja čvrstoće pri čemu se maksimalna vrijednost, zbog nepravilnosti sloja ljepila male debljine, pojavljuje tek od 0,05 mm. U području 2 čvrstoća postiže maksimalnu vrijednost, a u području 3, iznad 0,2 mm počinje postepeni pad čvrstoće ljepila koja od 0,5 mm postiže konstantu. [25]



Slika 24. Utjecaj debljine sloja ljepila na čvrstoću spoja [25]

U svrhu izračunavanja čvrstoće spoja razvijene su mnoge metode. Nijedna metoda nema objedinjene sve moguće parametre i uvjete lijepljenog spoja te zato nijedna metoda nije univerzalna i ne daje savršeno precizne rezultate. Neke od metoda su: Volkersenova metoda, Schliekelmanova modifikacija Volkersenove metode, metoda Golanda i Reissnera, metoda Freya, metoda Wintera i Meckelburga, Millerova metoda, metoda razvijena na FSB-u, itd. Uglavnom se sve metode baziraju na izračunu dopuštenog smičnog naprezanja. Volkersenova metoda [9] računa dopušteno smično naprezanje (3) preko čimbenika ljepila K , čimbenika materijala M i čimbenika oblikovanja f :

$$\tau_B = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\tau_B = K \times M \times f \quad (3)$$

gdje se čimbenik ljepila K računa:

$$K = \tau_{Bmax} \times \sqrt{\frac{2d}{G}} \quad (4)$$

čimbenik materijala M :

$$M = \sqrt{E} \quad (5)$$

čimbenik oblikovanja f :

$$f = \frac{\sqrt{s}}{l} \quad (6)$$

gdje je:

d – debljina sloja ljepila (mm)

s – debljina zalijepljenih spojeva (mm)

l – duljina preklopa (mm)

E – modul elastičnosti zalijepljenih dijelova (N/mm^2)

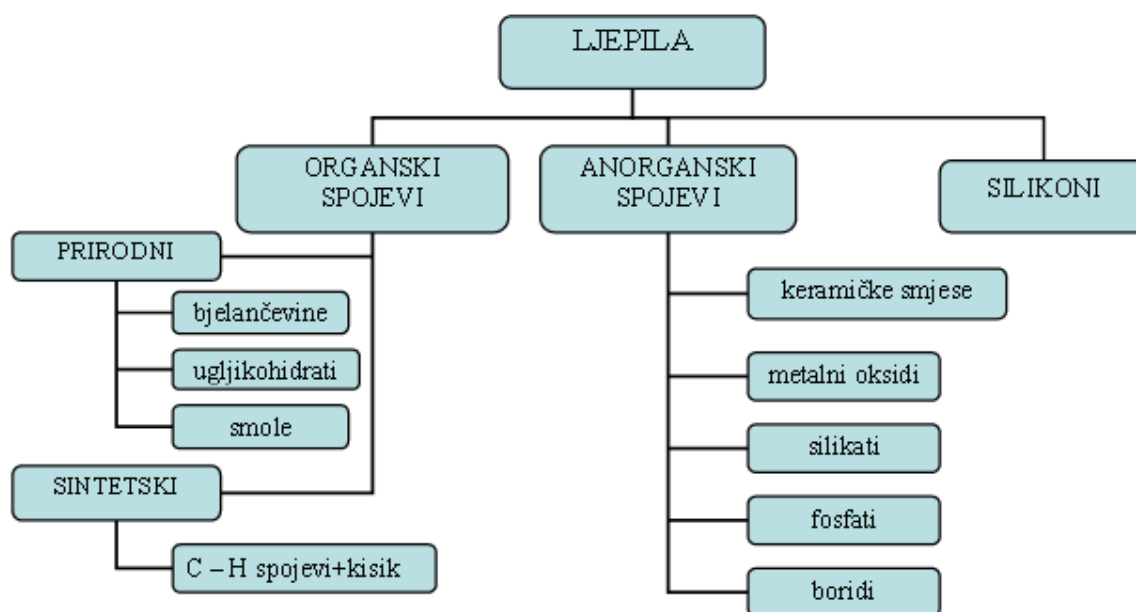
G – modul smicanja ljepila (N/mm^2)

τ_B - prosječno smično naprezanje kod loma lijepljenog spoja (N/mm^2)

τ_{Bmax} - maksimalno smično naprezanje kod loma lijepljenog spoja (N/mm^2).

3. VRSTE LJEPILA

Ranije u tekstu je navedena podjela prema DIN EN 923:2015 normi na fizikalno i kemijski veziva ljepila, no zbog raznolike ponude ljepila na tržištu, za razne namjene i materijale, postoji cijeli niz podjela ljepila. Podjela prema dotičnoj normi je bazirana na kriteriju mehanizma stvrdnjavanja, a postoji još jedna važna podjela čiji je kriterij kemijski sastav. Ta podjela prikazana je na slici 25. Ljepila se također mogu dijeliti prema primjeni: za strukturno lijepljenje, osiguranje vijaka, brtvljenje, itd.



Slika 25. Podjela ljepila prema kemijskom sastavu [24]

3.1. Epoksidna ljepila

Epoksidna ljepila (slika 26) se uglavnom koriste kada je potreban prijenos velikih opterećenja ili kao zamjena za uobičajene mehaničke metode spajanja. Dva dijela lijepljena na ovaj način mogu se smatrati strukturno povezanim. Mehanička svojstva, kao što su visoka čvrstoća, visok modul čvrstoće i dobro prijanjanje, dokazana su kod brojnih primjena u zahtjevnim granama industrije poput aeronautike i automobilske industrije.

Okvirne vrijednosti smične čvrstoće epoksidnih ljepila za pojedine osnovne materijale iznose [32]:

- konstrukcijski čelik (pjeskareni) - $15 \div 30 \text{ N/mm}^2$,
- nehrđajući čelik - $8 \div 20 \text{ N/mm}^2$,
- aluminij - $8 \div 15 \text{ N/mm}^2$.

Prednosti epoksidnih ljepila su:

- Jednostavnija izrada konstrukcija zahvaljujući većoj čvrstoći/krutosti za prijenos opterećenja,
- Sprečavanje zamora materijala i lomova ostvaruje se ravnomjernom raspodjelom opterećenja (distribucijom opterećenja) i očuvanjem integriteta konstrukcije (nema negativnog utjecaja toplinske i mehaničke obrade dijelova),
- Smanjenje troškova proizvodnje zamjenom klasičnih mehaničkih metoda spajanja (vijci, zakovice ili zavarivanje),
- Omogućuje raznolike kombinacije materijala, npr. metal/plastika, metal/staklo, metal/drvo itd.



Slika 26. Epoksidno dvokomponentno ljepilo [17]

3.2. Cijanoakrilati

Cijanoakrilati (slika 27) su jednokomponentna ljepila bez otapala, koja se stvrdnjavaju nakon izlaganja vlazi pri sobnoj temperaturi. Da bi se dobila trajna visoka čvrstoća ovih spojeva potrebno je osigurati pritisak tijekom stvrdnjavanja ljepila. Mane cijanoakrilata su kratak rok upotrebljivosti (ne smiju biti skladištena duže od jedne godine), te treba pažljivo rukovati s njima jer može doći do trovanja parama, te opekotina ukoliko ljepilo dođe u kontakt s nekim prirodnim materijalima kao što su pamuk, vuna, jer se pritom razvijaju nagle egzotermne reakcije.

Cijanoakrilati obično imaju slabiju čvrstoću na smična naprezanja od epoksidnih ljepila, te se stoga često koriste za proizvode koje je potrebno zalijepiti samo na određeno vrijeme. Okvirne vrijednosti smične čvrstoće akrilnih ljepila za pojedine osnovne materijale iznose [32]:

- konstrukcijski čelik (pjeskareni) - $8 \div 25 \text{ N/mm}^2$,
- nehrđajući čelik - $8 \div 15 \text{ N/mm}^2$,
- aluminij - $8 \div 20 \text{ N/mm}^2$.



Slika 27. Cijanoakrilati [18]

3.3. Silikonska ljepila

Silikonska ljepila (slika 28) biraju se uglavnom zbog svoje sposobnosti da elastično apsorbiraju i kompenziraju dinamička opterećenja, uz svojstvo prijenosa opterećenja koje ljepilo posjeduje. Uz svoja elastična svojstva pružaju i veliku toplinsku otpornost, visoku unutarnju čvrstoću (koheziju) i dobru antikorozivnu otpornost. Postoje jednokomponentna i dvokomponentna silikonska ljepila. Jednokomponentna stvrdnjavaju tako da se izlože vlazi u zraku, dok dvokomponentna stvrdnjavaju polimerizacijskom reakcijom. Okvirne vrijednosti smične čvrstoće silikonskih ljepila iznose oko 2 N/mm^2 kod lijepljenja većine vrsta osnovnih materijala [32].



Slika 28. Silikonsko ljepilo [17]

3.4. UV stvrdnjavajuća ljepila

Osim izvrsnih karakteristika lijepljenja i prozirnosti, UV ljepila (slika 29) nude i jedinstvene prednosti obrade i iznimne pogodnosti u smislu uštede. Kada su izložena dovoljnoj količini svjetla prikladnih valnih duljina, UV ljepila vrlo brzo stvrdnjavaju i tako omogućuju brze cikluse proizvodnje, linijsku kontrolu kvalitete i brz prelazak na druge korake u procesu. Kako bi stvrdnjavanje UV ljepila bilo pouzdano, svjetlo mora doprijeti do ljepila. Najmanje jedan dio koji se lijepi mora biti proziran za valnu duljinu svjetlosti kako bi se odabrano ljepilo stvrdnulo i zato se UV ljepila najčešće koriste za lijepljenje plastike i stakla u kombinaciji s čelikom. Okvirne vrijednosti smične čvrstoće UV ljepila iznose oko 4 N/mm^2 kod lijepljenja većine vrsta osnovnih materijala [32].

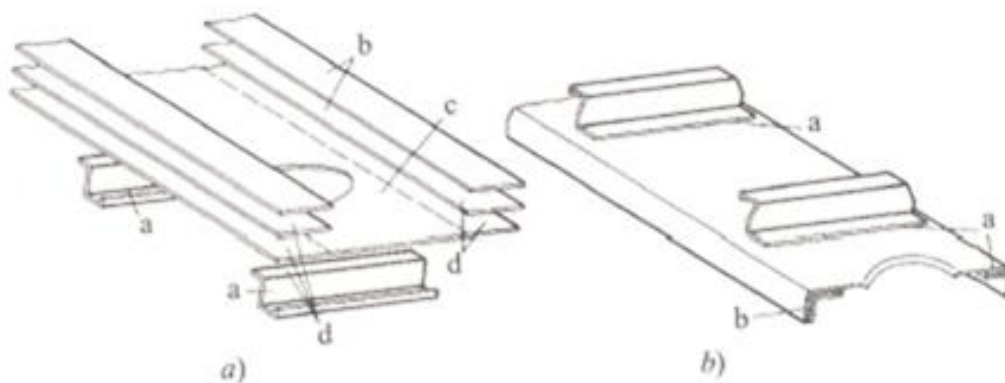


Slika 29. UV ljepilo [17]

4. PRIMJENA LJEPILA U INDUSTRIJI

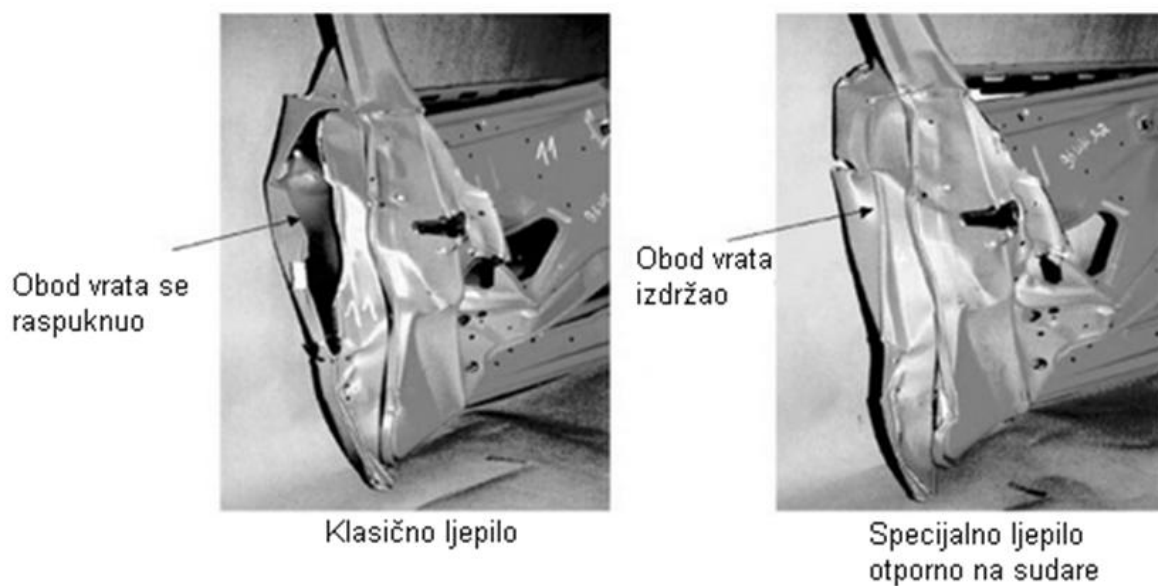
Ljepilo se unatoč relativno maloj čvrstoći, starenju spoja i gubitku čvrstoće, u mnogim slučajevima koristi jer se ne može izbjeći ili pruža neka jedinstvena svojstva. Najčešće se koristi u automobilskoj industriji, zrakoplovnoj industriji, za brtvljenje i osiguranje vijaka, strojogradnji, itd. U zrakoplovnoj industriji je zbog letnih karakteristika zrakoplova iznimno važna primjena laganih legura, a samim time i što lakših spojeva tih legura. Ljepila zbog svoje male specifične mase, kao i zbog tankog sloja ljepila u spojevima imaju prednost ispred zavarenih i vijčanih spojeva, a u novije vrijeme i zakovica.

Na slici 30 je prikazano lijepljenje zrakoplovnih nosača. Na lijevom dijelu slike su dijelovi nosača prije lijepljenja: a - ukrućenje vertikalnih nosača, b – pojasne ploče, c – vertikalni nosač, d – lijepljene površine. Na desnom dijelu slike je prikazan zalijepljeni nosač, gledan s donje strane u odnosu na lijevi dio slike. Oznake na desnoj strani slike prikazuju: a – lijepljeni spojevi, b – svinuti pojasi.



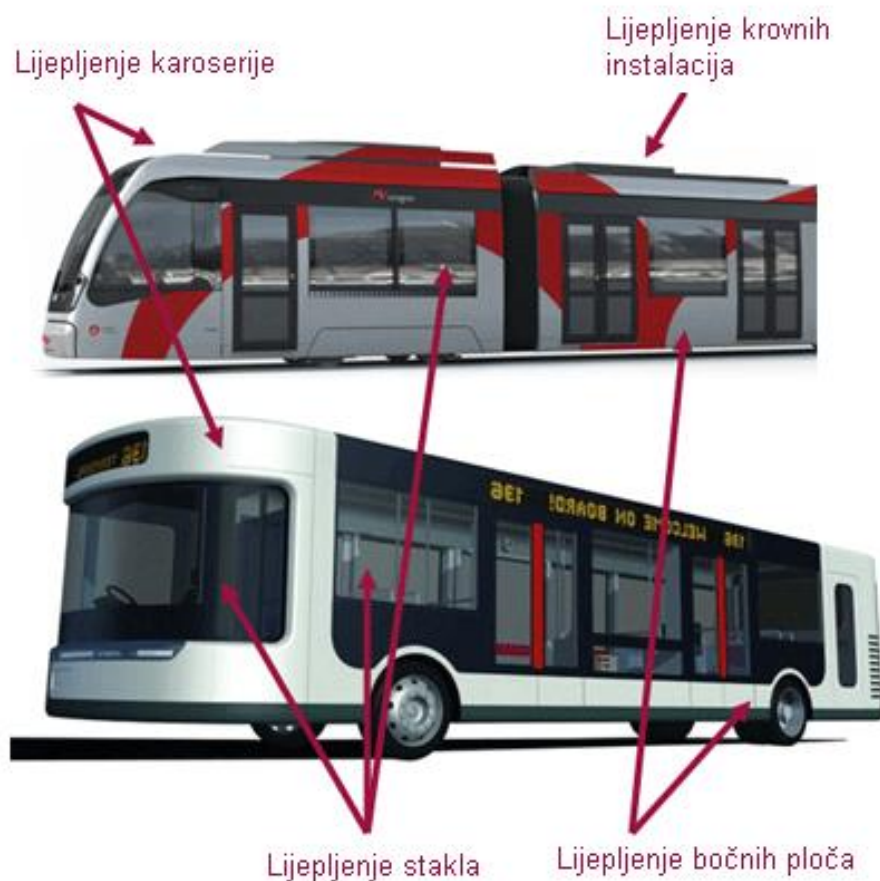
Slika 30. Primjena ljepila na zrakoplovnim nosačima [3]

Iz istog razloga zašto se ljepila sve više upotrebljavaju u avioindustriji, ljepilo se sve češće upotrebljava i u proizvodnji ostalih vozila: automobila, kamiona, tramvaja, vlakova. Ljepila imaju mnoge prednosti u odnosu na ostale načine spajanja jer omogućuju brtvljenje dijelova u motoru vozila, brtvljenje spremnika i prozora, otpornost na vibracije, djeluju kao izolatori u električnim instalacijama, te mnoge druge prednosti. U novije vrijeme sve se više razvijaju i specijalna ljepila otporna na udarce i sudare (slika 31).



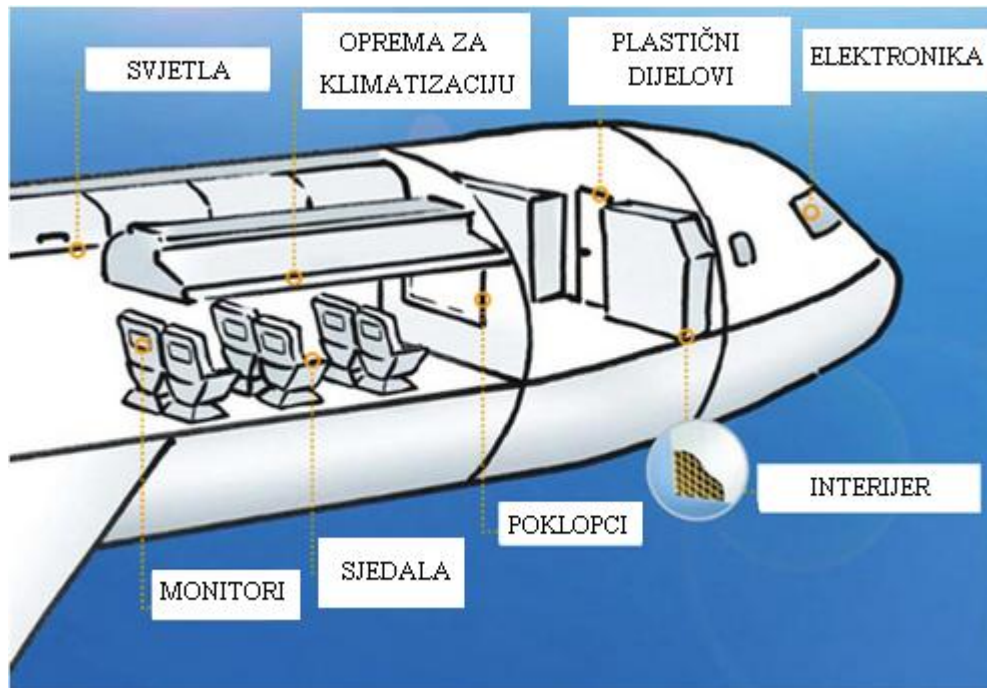
Slika 31. Primjena ljepila uzdržljivog na sudare [10]

Kod vlakova i autobusa se također susreće velika primjena ljepila, ponajviše u sastavljanju prozora i ploča (panela). To je prikazano na slici 32.



Slika 32. Lijepljeni spojevi na vozilima [28]

Zbog estetike proizvoda, posebno unutrašnjosti vozila, ljepila se koriste za spajanje većine dijelova koji nisu značajnije mehanički opterećeni. Na slici 33 su prikazani dijelovi interijera u putničkom zrakoplovu koji se lijepe.



Slika 33. Lijepljeni spojevi u interijeru zrakoplova [29]

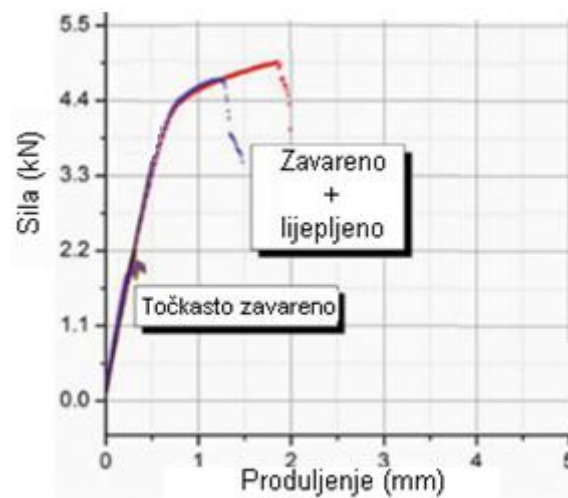
Na slici 34 je prikazana upotreba ljepila tijekom sastavljanja dijelova automobila.



Slika 34. Lijepljenje dijelova automobila [30]

Ljepilo se također upotrebljava i u kombinaciji s drugim tehnologijama, npr. ljepilo i zakovice ili ljepilo i točkasti zavari pružaju sve prednosti lijepljenih spojeva i sve prednosti zavarenih spojeva ili zakovičnih spojeva, stoga se često upotrebljavaju ta rješenja. Na slici 35 su prikazana opterećenja kod kojih je došlo do loma spoja. Uspoređen je točkasti zavar i točkasti zavar

dodatno učvršćen ljepljivom na osnovnom materijalu od aluminija. Uočljivo je da kombinacijom lijepljenja i točkastog zavarivanja spoj može podnijeti više od dva puta veća opterećenja nego samo točkasto zavareni spoj.



Slika 35. Svojstva hibridnih spojeva [20]

Kod sportske opreme je važno da spojevi budu što manji i čvršći, te otporni na udarce i vremenske uvjete. Ako se uzme u obzir da se često spajaju različiti materijali (čelik, tkanina, plastika, guma) lijepljenje ostaje praktički jedina moguća tehnologija spajanja takvih proizvoda. Na slici 36 je prikazana sportska oprema koja se lijepi.



Slika 36. Lijepljenje sportske opreme [31]

Lijepljenje je zbog svojih prednosti neizostavna tehnologija i kod sklapanja većine kućanskih aparata, te elektroničke opreme.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Opis eksperimenta

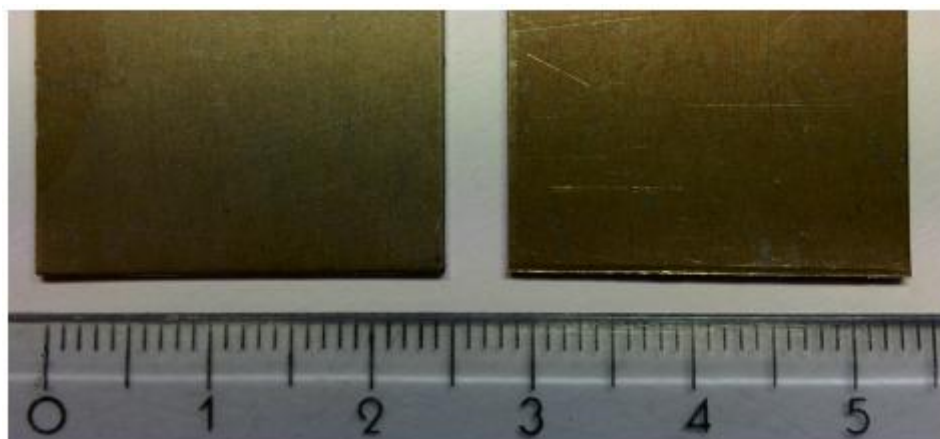
U eksperimentalnom dijelu rada je objašnjen utjecaj pripreme površine na čvrstoću lijepljenog spoja. Stoga je na šest uzoraka, površina koja se lijepi, obrađena na različite načine. Za osnovni materijal je odabran konstrukcijski čelik S235 koji je zahvaćen početnim stadijem opće korozije. Osnovni materijal je u obliku pločica dimenzija: duljina – 85 mm, širina – 25 mm, debljina – 1 mm. Na slici 37 su prikazane pločice i pribor s kojim je lijepljeni spoj izveden.



Slika 37. Uzorci od konstrukcijskog čelika i oprema korištena pri lijepljenju

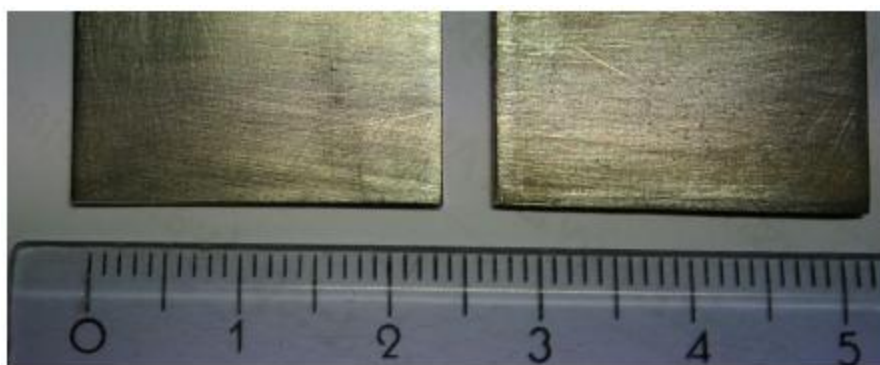
5.2. Priprema površine lijepljenih spojeva

Površina prvog uzorka nije obrađena uopće nego je samo prebrisana od prašine. Površina drugog uzorka nije obrađena mehanički nego je samo uklonjena masnoća uranjanjem u etanol te ispiranjem i sušenjem (slika 38).



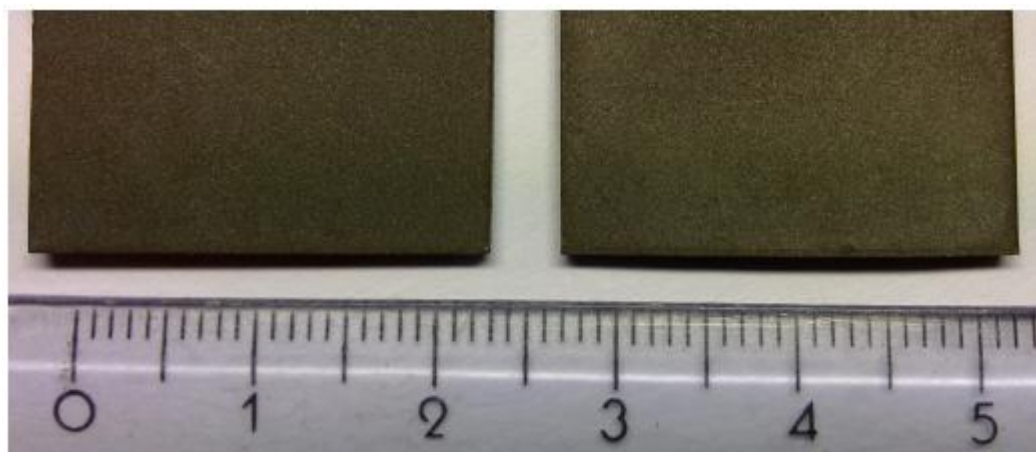
Slika 38. Uzorak 1 (desno) i 2 (lijevo)

Površina trećeg uzorka je ručno pobrušena brusnim papirom granulacije 240 te je isprana i osušena. Površina četvrtog uzorka je ručno pobrušena istim brusnim papirom, te uronjena u etanol, isprana i osušena (slika 39).



Slika 39. Uzorak 3 (desno) i 4 (lijevo)

Površina petog uzorka je pjeskarena te isprana i posušena. Površina šestog uzorka je pjeskarena, uronjena u etanol, isprana i osušena (slika 40).



Slika 40. Uzorak 5 (desno) i 6 (lijevo)

5.3. Vrsta ljepila

Nakon pripreme površine, uzorci su zalijepljeni epoksidnim dvokomponentnim ljepilom Loctite EA 3430 A&B (slika 41). To je višenamjensko, optički prozirno ljepilo srednje viskoznosti, te otporno na vodu. Namijenjeno je za lijepljenje kombinacija istih ili različitih površina metala, mramora, betona, plastike. Može biti primjenjeno za predmete koji se koriste u širokom rasponu temperatura od -40 do $+120^{\circ}\text{C}$. Preporučeno je zalijepiti spoj na sobnoj temperaturi u vremenskom trajanju oko 5 minuta nakon otvaranja i miješanja ljepila. Ljepilo je otporno na vibracije i udarce, vremenske uvjete, te se može premazivati i stoga je prihvatljiva primjena ovog ljepila u autoindustriji [21]. U tablici 5 su prikazana svojstva epoksidnog ljepila Loctite EA 3430 A&B.



Slika 41. Ljepilo Loctite EA 3430 A&B

Tablica 5. Epoksidno ljepilo Loctite EA 3430 A&B [22]

Kemijski tip	Epoksid
Izgled (Smola)	Ultra prozirna
Izgled (Utvrdivač)	Ultra prozirna
Izgled (Mješavina)	Ultra prozirna, providna
Komponente	Dvije komponente - Smola & Utvrđivač
Volumni omjer miješanja - Smola : Utvrđivač	1: 1
Maseni omjer miješanja - Smola : Utvrđivač	100:100
Stvrdnjavanje	Stvrdnjavanje na sobnoj temperaturi nakon miješanja

U tablici 6 su prikazani utjecaji raznih kemikalija i otapala na lijepljeni spoj izveden s ljepilom Loctite EA 3430 A&B, te dužina vremena i temperatura medija pri kojem su lijepljeni spojevi bili izloženi.

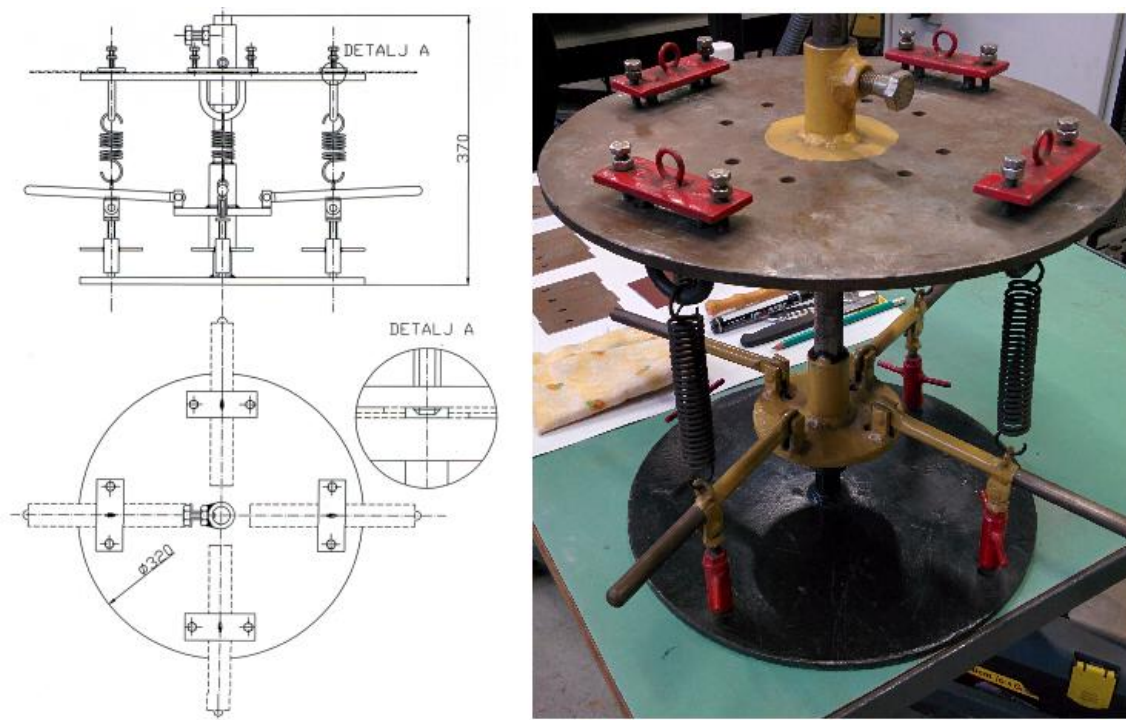
Tablica 6. Otpornost lijepljenih spojeva (Loctite EA 3430 A&B) na otapala i kemikalije [22]

Medij	°C	% inicijalne čvrstoće		
		500 h	1000 h	3000 h
Voda	60	55	50	45
Voda	90	50	40	20
Motorno ulje	22	85	75	75
Bezolovni benzin	22	95	90	75
Voda/glikol 50/50	87	25	20	20
Natrij klorid, 7.5%	22	95	95	80
Aceton	22	85	75	75
Octena kiselina, 10%	22	85	75	50
Natrij hidroksid, 4%	22	90	85	80

Na svaki uzorak je nanešen tanki sloj ljepila. Sloj ljepila je razmazan ručnim alatom. Nakon što se ljepilo stvrdnulo, pomičnim mjerilom je izmjerena ukupna debljina sloja ljepila, koja je na svim uzorcima iznosila približno 0,15 mm.

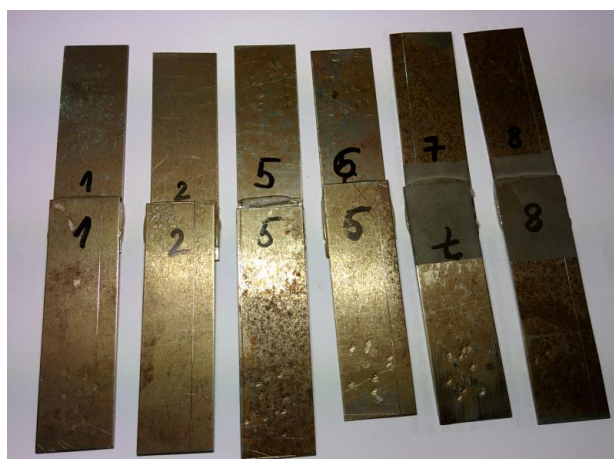
5.4. Stezanje spojeva

Nakon što su lijepljeni dijelovi pritisnuti, stavljeni su u napravu koja silom u oprugama jednoliko pritišće sve uzorke. Izmjerena sila pritiska bila je približno 100 N. Na slici 42 je prikazana korištena naprava.



Slika 42. naprava za pritiskanje spojeva [9]

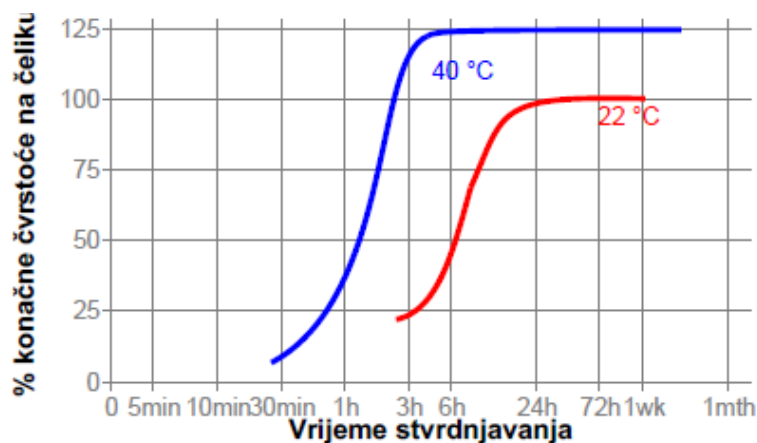
Uzorci su držani u napravi 24 sata, a zatim su izvađeni i ostavljeni još 24 sata da miruju, što je prikazano na slici 43.



Slika 43. Uzorci tijekom 24-satnog mirovanja

5.5. Čvrstoća lijepljenih spojeva

U tehničkim karakteristikama ljepila koje je propisao proizvođač (slika 44) je ustanovljeno da je spoj nakon 24 sata stvrdnjavanja pri sobnoj temperaturi dostigao oko 98% maksimalne čvrstoće, dok nakon 48 sati stvrdnjavanja dostiže 100% maksimalne čvrstoće te vrste ljepila. Iz tog razloga su zalijepljeni uzorci ostavljeni da miruju 24 sata prije izvođenja ispitivanja.



Slika 44. Ovisnost čvrstoće spoja o vremenu stvrdnjavanja [22]

Nakon toga uzorci su podvrgnuti ispitivanju na smično naprezanje. Ispitivanje je izvršeno na kidalici Alfred J. Amsler (prikazanoj na slici 45) u mjernom području između 0 i 250 kN.



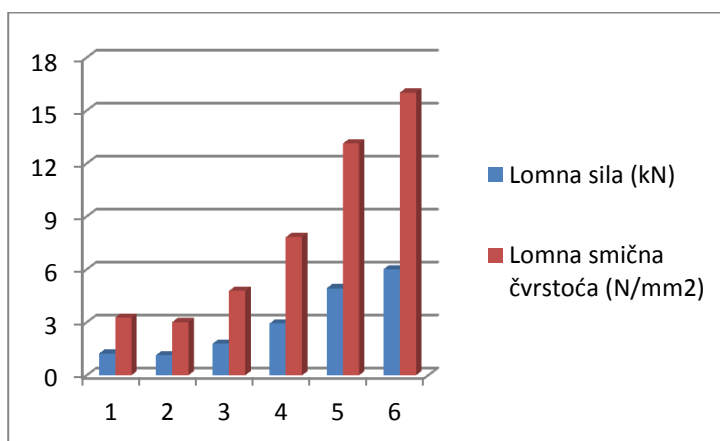
Slika 45. Univerzalna kidalica

Od proizvođača propisana smična čvrstoća spoja za pjeskarene meke čelike bi trebala iznositi 22 N/mm², dok bi za nehrđajuće čelike trebala iznositi 15 N/mm².

Površina lijepljenog spoja kod svih uzoraka je bila 375 mm². Duljina jednostrukog preklopnog spoja je 15 mm, širina 25 mm, a debljina osnovnog materijala 1mm.

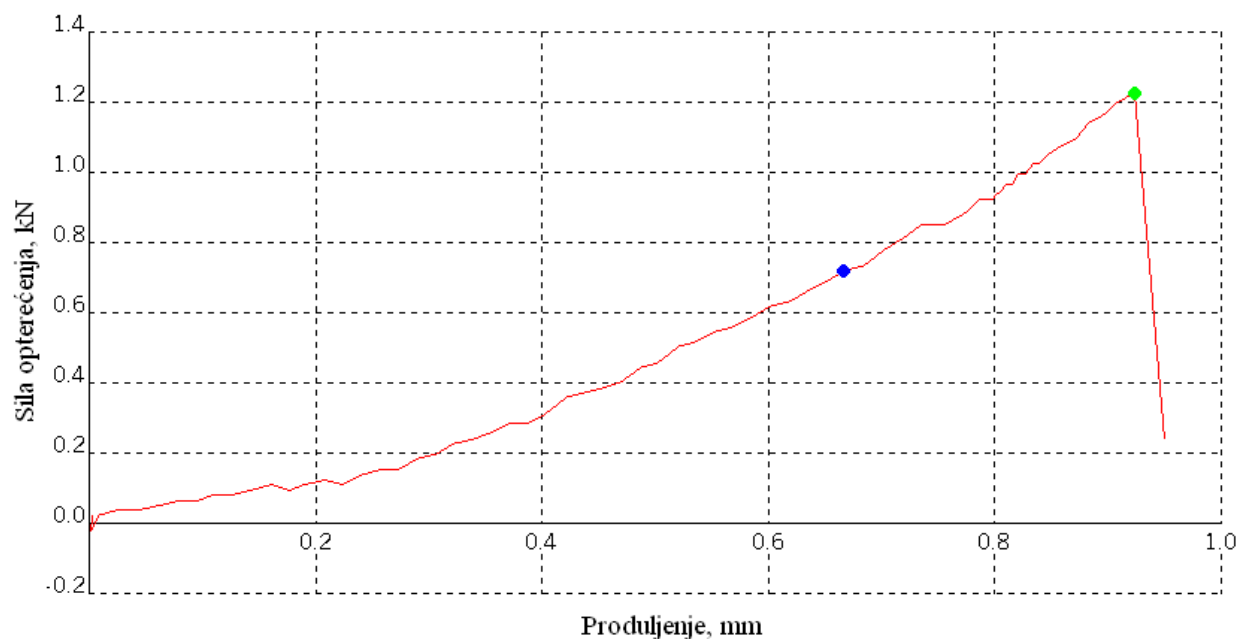
Tablica 7. Usporedba različito pripremljenih površina kod lijepljenih spojeva

Uzorak br.	Način pripreme površine	Lomna sila (kN)	Lomna smična čvrstoća (N/mm ²)
1	-	1,227	3,27
2	Masnoća uklonjena uranjanjem u etanol te ispiranjem i sušenjem	1,129	3,01
3	Pobrušena brusnim papirom granulacije 240 te isprana i osušena	1,794	4,78
4	Ručno brusnim papirom granulacije 240, te uronjena u etanol, isprana i osušena	2,935	7,83
5	Pjeskarena te isprana i posušena	4,925	13,13
6	Pjeskarena, uronjena u etanol, isprana i osušena	6,005	16,01



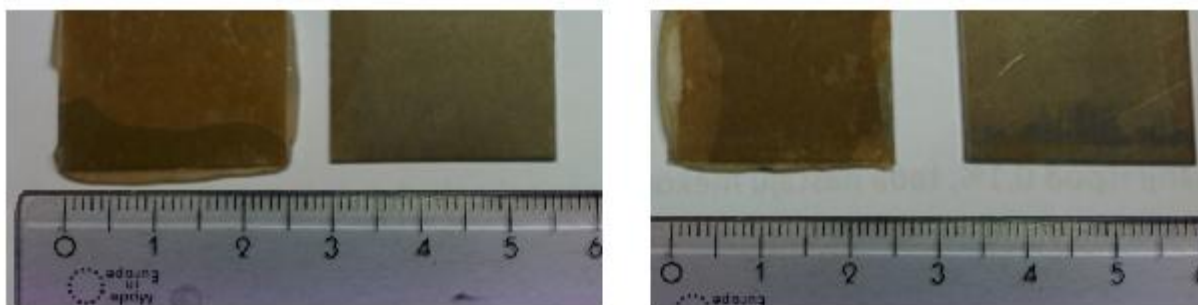
Iz tablice 7 (graf) se jasno vidi da je čvrstoća spoja direktno povezana s pripremom lijepljenih dijelova. Što je priprema lijepljenih dijelova kvalitetnija, to su i čvrstoće lijepljenih spojeva veće.

Na sljedećim slikama prikazana su ispitivanja na smik, tj. utjecaj sile opterećenja na produljenje lijepljenog spoja, te izgled puknutog spoja. Produljenje spoja na svim ispitivanjima uzoraka se ne može uzeti kao relevantno zbog manjeg ili većeg proklizivanja uzoraka kroz kliješta kidalice. Pošto je za ovaj eksperiment najvažnije određivanje smične čvrstoće spoja, to nije bio značajan problem.



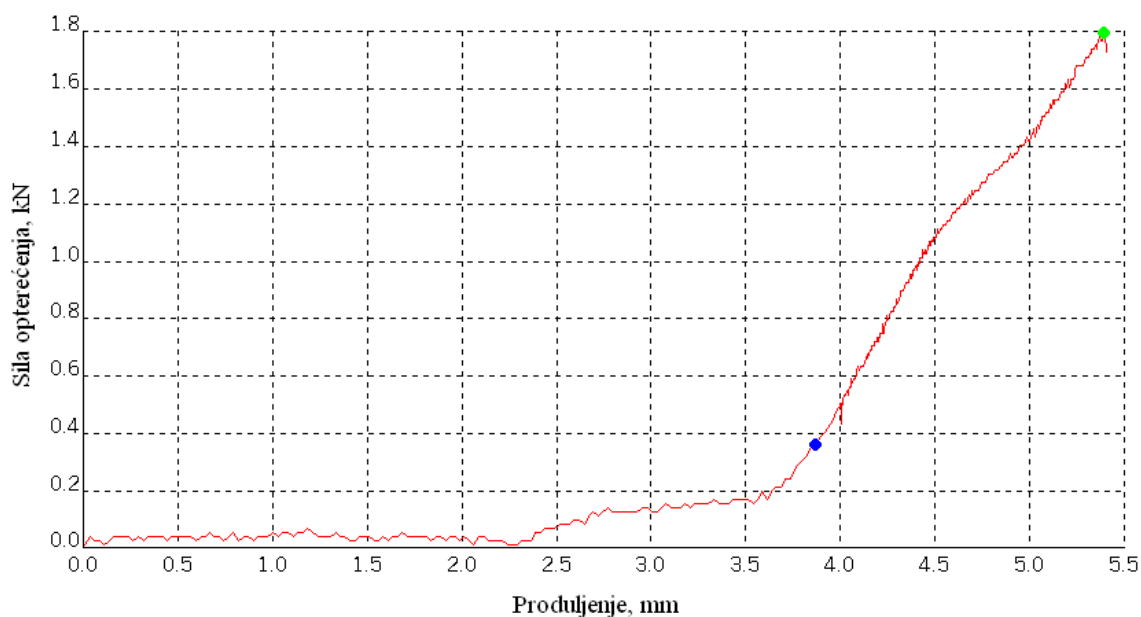
Slika 46. Ispitivanje uzorka 1

Na slici 46 je prikazano ispitivanje uzorka 1. Vidi se linearni porast produljenja u odnosu na silu opterećenja, te nagli lom lijepljenog spoja. Ispitivanje uzorka 2 dalo je gotovo identične rezultate.



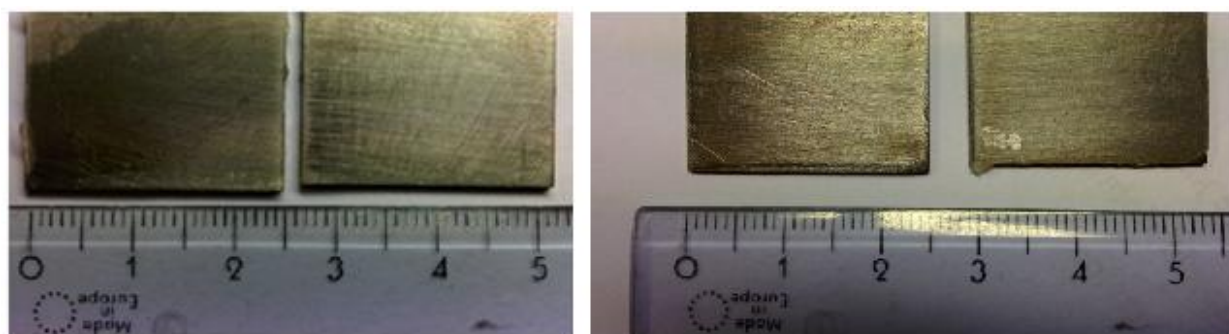
Slika 47. Adhezijski lom uzoraka 1 (desno) i 2 (lijevo)

Na slici 47 se jasno vidi da je kod uzoraka 1 i 2 došlo do potpunog adhezijskog loma, tj. ljepilo se nije uspjelo dobro povezati za oba dijela lijepljenog spoja zbog nekvalitetne i neprimjerene pripreme površine.



Slika 48. Ispitivanje uzorka 3

Na slici 48 je prikazano ispitivanje uzorka 3 te se vidi da je prvotno došlo do značajnog proklizivanja uzorka kroz kliješta kidalice, ali naknadnim učvršćenjem kliješta je ispitivanje uspješno izvršeno.



Slika 49. Uzorak 3 (desno) i 4 (lijevo)

Na slici 49 su prikazani uzorci 3 i 4, na kojima se razaznaje kombinirani adhezijski i kohezijski lom. Za razliku od uzoraka 1 i 2, na kojima se dogodio čisti adhezijski lom, na uzorcima 3 i 4, zbog kvalitetnije pripremljene površine, dolazi po povećanja adhezijskih sila, koje uzrokuju da do loma djelomično dođe i u sloju ljepila.

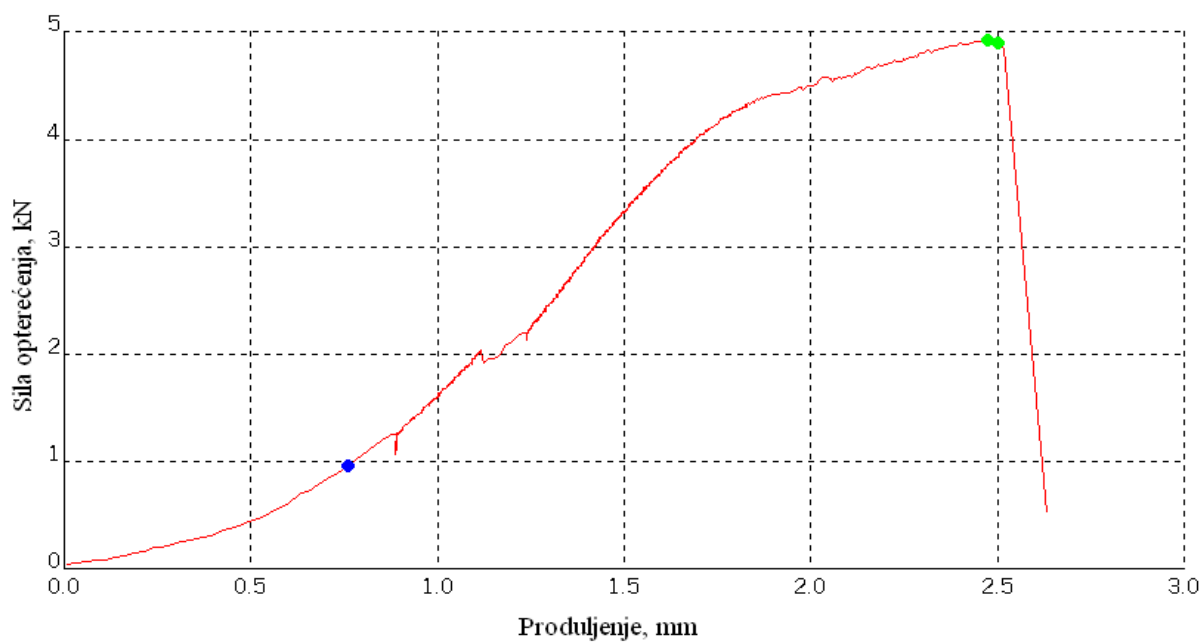
Tijekom ispitivanja uzorka 5, ponovno je nastupilo proklizivanje kliješta kidalice, jer je sila opterećenja iznosila preko 3 kN, a dotična kliješta su mogla izdržati maksimalnu silu od 3 kN. Stoga su za ispitivanje uzoraka 5 i 6 korištena kliješta koja mogu podnijeti veće sile. Na slici 50

su prikazana kliješta (lijevo) koja su se koristila za ispitivanje uzoraka 1, 2, 3 i 4 te kliješta koja su se ispitivala za ispitivanje uzoraka 5 i 6 (desno).

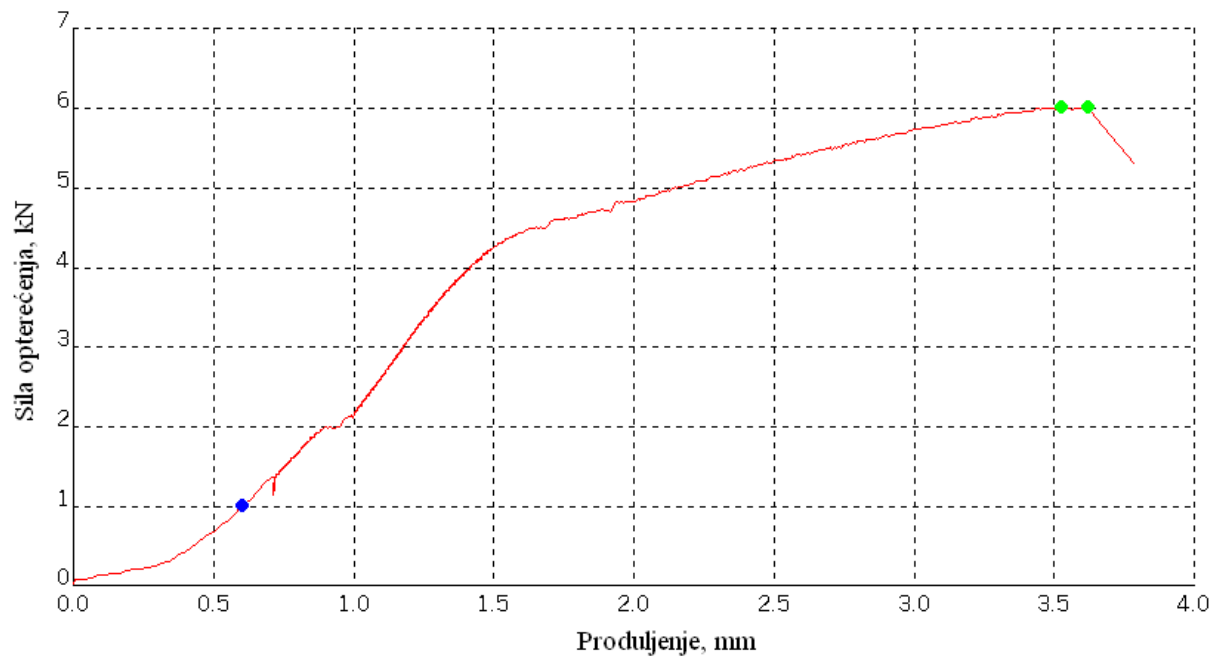


Slika 50. Kliješta za stezanje uzoraka na kidalici

Na slikama 51 i 52 su prikazana ispitivanja uzoraka 5 i 6 na kidalici. Uzorak 6 je podnio najveća opterećenja kako se i očekivalo s obzirom na to da je površina tog uzorka bila najbolje pripremljena.

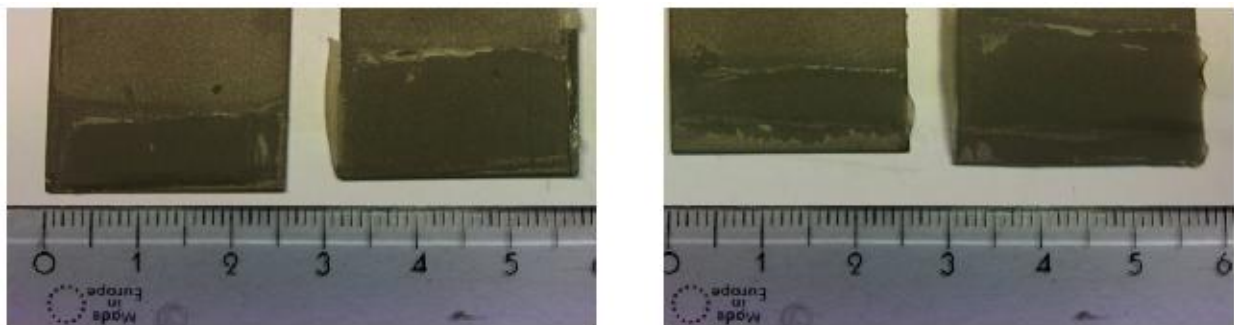


Slika 51. Ispitivanje uzorka 5



Slika 52. Ispitivanje uzorka 6

Na slici 53 se vidi kombinirani adhezijski i kohezijski lom prisutan na uzorcima 5 (lijevo) i 6 (desno).



Slika 53. Uzorci 5 (lijevo) i 6 (desno)

Iz rezultata eksperimenta se dolazi do zaključka da je pjeskarenje površine najpogodnija primjena u slučaju lijepljenja konstrukcijskog čelika sa ljepilom Loctite EA 3430 A&B (kao i sa većinom drugih ljepila), a ukoliko bi se površina još kemijski obradila, mogući su još i bolji rezultati.

6. ZAKLJUČAK

Tehnologija lijepljenja je značajna u industriji upravo iz svojih jedinstvenih prednosti u usporedbi s drugim postupcima spajanja. Neke od najvažnijih prednosti su izvrsna zaštita od korozije, mala masa samog spoja, jednolik raspored naprezanja i dobro prigušivanje vibracija.

Iz provedenog eksperimenta se dolazi do jasnog i nedvojbenog zaključka da je kvalitetna priprema površine jedna od ključnih stavki na koju treba obratiti pozornost pri izradi lijepljenih spojeva. Kod konstrukcijskih čelika preporučljivo je površinu pjeskariti jer je dokazano da time čvrstoća lijepljenog spoja raste i do nekoliko puta. Također su razvijene i specifične tehnike kemijske obrade površina da bi povisile čvrstoću lijepljenih spojeva. Takva priprema površina ne mijenja samo fizička, već i kemijska svojstva površine, čime se prijanjanje ljepila o površinu poboljšava.

Tehnologija lijepljenja je svakako perspektivna tehnologija, koja bi se mogla početi češće upotrebljavati ukoliko dođe do razjašnjavanja svih nepoznanica oko ove tehnologije. U slučaju razjašnjenja slabljenja i pucanja adhezijskih veza tijekom vremena, tj. razjašnjenja mehanizama lijepljenja, može se očekivati unaprjeđenje tehnologije lijepljenja, a samim time i povišenje čvrstoća lijepljenih spojeva te usporavanje pucanja adhezijskih veza tijekom vremena u eksploataciji.

7. LITERATURA

- [1] Hrvatska enciklopedija, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=37713>, 11.1.2016.
Leksikografski zavod Miroslav Krleža
- [2] S. Zebić, Ž. Viličić: Ljepila, Tehnička enciklopedija, 1980, 7. knjiga
- [3] Karl-Heinz Decker: Elementi strojeva, Tehnička knjiga, 2006.
- [4] M. Opalić: Predavanja iz kolegija Elementi strojeva, 2010., FSB
- [5] Predavanja iz kolegija Grafički dizajn 2, 2012., Grafički fakultet – Sveučilište u Zagrebu
- [6] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, J. Vosiek: Roloff/Matek Maschinenelemente, 2003.
- [7] www.masterbond.com/resources/surface-preparation-bonding-metals, 23.1.2016.
- [8] LOCTITE: World design handbook, 2nd edition
- [9] Z. Kožuh: Utjecaj eksploatacijskih uvjeta na čvrstoću lijepljenih spojeva, doktorska disertacija, 1998., FSB
- [10] R. D. Adams: Adhesive bonding, Science, Technology and Applications, Woodhead publishing, 2005.
- [11] Loctite katalog: Proizvodi za održavanje, <http://www.loctite.hr/loctite-5084.htm?tn=5534>, 1.2.2016.
- [12] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, DTZI – seminar, 2007.
- [13] H. Fukanuma, N. Ohno: Influences of substrate roughness and temperature on adhesive strength in thermal spray coatings, Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology (ASM International), 2003, stranice: 1361 - 1368 (8)
- [14] www.sandblast.net/?page_id=230, 1.2.2016.
- [15] <http://www.loctite.hr/runa-oprema-za-nanoenje-4959.htm>, 1.2.2016.
- [16] <http://equipment.loctite.com>, 8.2.2016.
- [17] www.loctite.hr/proizvodi-prema-primjeni-4219.htm, 8.2.2016.
- [18] www.masterbond.com/products/, 8.2.2016.
- [19] <http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-applications.html>, 8.2.2016.
- [20] Tomasz Sadowski, Marcin Kneć & Przemysław Golewski: Spot welding-adhesive joints: Modeling and testing, The journal of adhesion, 2013, stranice: 346 - 364
- [21] Loctite: Rješenja za popravak i održavanje vozila,
<http://www.loctite.hr/loctite-5084.htm?tn=5534>, 1.2.2016.
- [22] Loctite: Technical data sheet – Loctite EA3430,
<http://www.loctite.hr/loctite-5084.htm?tn=5534>, 1.2.2016.

- [23] Bujanić B., Magdalenić Bujanić J.: Mehanizmi stvaranja lijepljenog spoja, Eko Međimurje, hrcak.srce.hr/file/124722, 5.2.2016.
- [24] P. Raos, M. Lucić: Konstrukcijsko lijepljenje, Autorizirana predavanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2003.
- [25] G. Habenicht: Kleben, Springer Verlag, Berlin, 1986
- [26] I. Žolo: Lijepljenje polimernih materijal, diplomski rad, 2008., FSB
- [27] <http://www.directindustry.com/prod/jp-selecta/product-69528-591664.html>, 11.2.2016.
- [28] <http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-applications.html>, 11.2.2016.
- [29] Magd Abdel Wahab: Joining Composites with Adhesives: Theory and Applications, DEStech Publications, Inc., 2015.
- [30] The Aluminium joining manual, European Aluminium association, 2015.
- [31] 3M katalog: 3M™ Scotch-Weld™ Structural Adhesives, http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Adhesives/Tapes/Products/~/_/Structural-Adhesives?N=5024768&rt=c3, 10.2.2016.
- [32] http://www.loctite.hr/hrc/content_data/205303_AG13034_AG_CAT_HR_WEB.pdf - Loctite katalog proizvoda, 13.2.2016.